

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра інженерної екології  
(повна назва кафедри)

"На правах рукопису"

УДК 621.039.77

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Ткачук К.К.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2018 р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності (спеціалізації) 101 «Екологія», «Інженерна екологія та  
ресурсозбереження»

на тему: «Трансмутація радіоактивних відходів з удосконаленням системи  
сповільнення швидких нейтронів»

Виконала: студентка 2 курсу, групи ОЗ-71мп  
(шифр групи)

Онисимчук Тетяна Михайлівна  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник ст. викл., к.т.н. Тверда Оксана Ярославівна  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент доц., к.т.н. Козлов Сергій Степанович  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут**  
**імені Ігоря Сікорського”**

Факультет (інститут) Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва)

Кафедра Інженерної екології  
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) за освітньо-професійною  
програмою  
перший (бакалаврський), другий (магістерський)

Спеціальність 101 «Екологія»  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Завідувач кафедри  
 \_\_\_\_\_ Ткачук К.К.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

### ЗАВДАННЯ

#### на дипломний проект студенту

Онисимчук Тетяні Михайлівні  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту «Трансмутація радіоактивних відходів з удосконаленням системи сповільнення швидких нейтронів»

науковий керівник дисертації к.т.н., ст. викл. Тверда О.Я.  
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту 11 грудня 2018 р

3. Об'єкт дослідження: трансмутація радіоактивних відходів у підкритичних системах із пластиковим сповільнювачем

4. Предмет дослідження: показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати існуючі методи модернізації систем сповільнення в підкритичних ядерних установках, виконати моделювання підкритичного реактора із пластиковим сповільнювачем,

*провести моделювання застосування пластику, що піддався переробці в системі сповільнення, розробити стартап-проект.*

6. Перелік графічного матеріалу: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій: *матеріали I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).*

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	Репін Микола Володимирович		

7. Дата видачі завдання

3.09.2018 р

#### Календарний план

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк подання етапів проекту	Примітка
1.	Аналіз існуючих методів удосконалення систем сповільнення в підкритичних ядерних установках;	24.09.2018 р.	Виконано
2.	Моделювання еталонного підкритичного ядерного реактора із пластиковим сповільнювачем;	29.10.2018 р.	Виконано
3.	Впровадження системи сповільнення швидких нейтронів із вторинної сировини	19.11.2018 р.	Виконано
4.	Розробка стартап-проекту	3.12.2018 р.	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Онисимчук Т.М.

\_\_\_\_\_

(прізвище, ініціали)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_

(підпис)

Тверда О.Я.

\_\_\_\_\_

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 99 сторінок, 30 ілюстрацію, 40 таблиць, 1 додаток та 59 джерела згідно з переліком посилань.

**Актуальність теми.** Неможливість використання традиційних систем сповільнення в підкритичних реакторах при трансмутації відпрацьованого ядерного палива зумовлює необхідність дослідження матеріалів, які забезпечуватимуть ефективність роботи підкритичних систем.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Актуальність даного дослідження обумовлене завданнями Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», зокрема створенням на загальнодержавному рівні основ для розбудови системи утилізації відходів паливно-енергетичного комплексу, забезпечення впровадження новітніх технологій та обміну інформацією щодо утилізації радіоактивних відходів та ін..

**Мета дослідження** – виявлення можливості застосування пластикового сповільнювача в підкритичних ядерних установках, керованих зовнішнім джерелом нейтронів та встановлення залежності забруднення повітря радіоактивними речовинами від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних процесів переробки.

### **Задачі дослідження:**

- проаналізувати існуючі методи модернізації систем сповільнення в підкритичних ядерних установках;
- виконати моделювання підкритичного реактора із пластиковим сповільнювачем;
- провести моделювання застосування пластику, що піддався переробці, в системі сповільнення;
- розробити стартап-проект;

**Об'єкт дослідження:** трансмутація радіоактивних відходів у підкритичних системах із пластиковим сповільнювачем.

**Предмет дослідження:** показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем.

**Методи дослідження.** В роботі використані загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних та експериментальних досліджень; методи математичної та статистичної обробки даних для моделювання досліджуваних параметрів; методи обчислювальної техніки при проведенні трудомістких розрахунків; методи математичного моделювання для визначення оптимальних характеристик досліджуваних систем та комп'ютерного моделювання для візуалізації отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі вперше визначено показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем, доведено можливість застосування вторинного полімеру в якості сповільнювача швидких нейронів та встановлено залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень доцільно застосовувати при проектуванні дослідних та експериментальних підкритичних ядерних установок із значним збереженням матеріальних ресурсів за рахунок заміни традиційного сповільнювача.

**Апробація результатів дисертації.** Результати проведених досліджень оприлюднені у матеріалах I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВТОРИННА СИРОВИНА, ПІДКРИТИЧНИЙ ЯДЕРНИЙ РЕАКТОР, ПОЛІМЕР, СПОВІЛЬНЮВАЧ, ТРАНСМУТАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА.

## ABSTRACT

The master's dissertation contains 99 pages, 30 illustrations, 40 tables, 1 addition and 59 sources according to the list of references.

**Actuality of theme.** The impossibility of using traditional slowdown systems in subcritical reactors in the transmutation of spent nuclear fuel necessitates the study of materials that will ensure the effectiveness of subcritical systems.

**Relationship of work with scientific programs.** The urgency of this study is due to the tasks of the New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, energy efficiency, competitiveness", in particular, the creation at the state level of the bases for development of the waste utilization system of the fuel and energy complex, ensuring introduction of the latest technologies and exchange of information on the utilization of radioactive waste, etc.

**The purpose of the study** is to identify the possibility of using a plastic moderator in subcritical nuclear plants controlled by an external source of neutrons and establishing the dependence of air pollution by radioactive substances on the thickness of the outer layer of the retarder after cyclic processing processes.

**Research objectives:**

- analyze the existing methods of modernizing the slowdown systems in subcritical nuclear installations;
- perform a simulation of a subcritical reactor with a plastic moderator;
- carry out a simulation of the use of processed plastic in the system of deceleration;
- develop a startup project;

**Object of research:** transmutation of radioactive waste in subcritical systems with plastic moderator.

**Subject of research:** safety performance of subcritical systems with plastic moderator.

**Research methods.** In this work general scientific methods of analysis and synthesis are used – during studying of literary data and experimental researches; methods of mathematical and statistical processing of data for modeling of investigated parameters; methods of computer technology during labor-intensive calculations; methods of mathematical modeling for determining optimal characteristics of the studied systems and computer modeling for visualization of the obtained results.

**Scientific novelty of the obtained results.** In the work for the first time the indicators of safety of the functioning of subcritical systems with plastic moderator were determined, the possibility of using the secondary polymer as a moderator of fast neutrons was proved and the dependence of the ionizing radiation transmittance coefficient from the cycle of processing the material of the protective layer was established.

**The practical value of the results.** The results of research should be used in the design of research and experimental subcritical nuclear installation with significant conservation of material resources by replacing the traditional moderator.

**Approbation of the results of the dissertation.** The results of the conducted researches were published in the materials of the I Scientific and Technical Conference of the Master's students of the Energy Saving and Energy Management Institute (based on the results of the dissertation researches of the undergraduate students).

**KEY WORDS:** SECONDARY RAW MATERIAL, SUBCRITICAL NUCLEAR REACTOR, POLYMER, MODERATOR, TRANSMUTATION OF SPENT NUCLEAR FUEL.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УДОСКОНАДЕННЯ СИСТЕМИ СПОВІЛЬНЕННЯ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ .....	12
1.1 Застосування пластикових сповільнювачів у радіаційному контролі.....	14
1.2 Застосування пластикових систем сповільнення у підкритичних ядерних установках.....	20
Висновки до розділу 1 .....	23
2 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПІДКРИТИЧНОГО РЕАКТОРА ІЗ ПЛАСТИКОВИМ СПОВІЛЬНЮВАЧЕМ.....	24
2.1 Вибір параметрів моделювання.....	24
2.2 Модель підкритичного реактора із пластиковим сповільнювачем .....	45
3 ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ СПОВІЛЬНЕННЯ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ ІЗ ВТОРСИРОВИНИ .....	56
3.1 Аналіз вторинної сировини для використання в системі сповільнення .	56
3.2 Модель підкритичного реактору із сповільнювачем з вторинного ПЕТФ 60	
3.3 Еколого-економічне обґрунтування застосування вторинної сировини в підкритичному реакторі .....	66
Висновки до розділу 3 .....	72
4 СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	74
4.1 Опис ідеї проекту .....	74
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	77
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	78
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	85
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	87
Висновки до розділу 4 .....	89
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	93
ДОДАТОК А.....	99



## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЕС – атомна електрична станція

АкЗ – активна зона

ВВЕР – водо-водяний енергетичний реактор

ВЯП – відпрацьоване ядерне паливо

ЄС – Європейський Союз

ЗВПП – заготівельно-виробниче приватне підприємство

ІНПРО – Міжнародний проект з інноваційних реакторів та паливних циклів

МАГАТЕ – Міжнародне агентство атомної енергетики

НАЕК – національна атомна енергогенеруюча компанія

ПВХ – полівінілхлорид

ПЕК – паливно-енергетичний комплекс

ПЕТФ – поліетилентерефталат

ПНТ – поліетилен низького тиску або високої густини

ПП – поліпропілен

ППР – попередньо-плановий ремонт

ПС – полістирол

ТВЕЛ – тепловиділяючий елемент

ТВЗ – тепловиділяюча збірка

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю

ФМ – фотонейтронна мішень

ЦСВЯП – централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Неможливість використання традиційних систем сповільнення в підкритичних реакторах при трансмутації відпрацьованого ядерного палива зумовлює необхідність дослідження матеріалів, які забезпечуватимуть ефективність роботи підкритичних систем.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Актуальність даного дослідження обумовлене завданнями Нової енергетичної стратегії України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», зокрема створенням на загальнодержавному рівні основ для розбудови системи утилізації відходів паливно-енергетичного комплексу, забезпечення впровадження новітніх технологій та обміну інформацією щодо утилізації радіоактивних відходів та ін..

**Мета дослідження** – виявлення можливості застосування пластикового сповільнювача в підкритичних ядерних установках, керованих зовнішнім джерелом нейтронів та встановлення залежності забруднення повітря радіоактивними речовинами від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних процесів переробки.

**Задачі дослідження:**

- проаналізувати існуючі методи модернізації систем сповільнення в підкритичних ядерних установках;
- виконати моделювання підкритичного реактора із пластиковим сповільнювачем;
- провести моделювання застосування пластику, що піддався переробці, в системі сповільнення;
- розробити стартап-проект;

**Об'єкт дослідження:** трансмутація радіоактивних відходів у підкритичних системах із пластиковим сповільнювачем.

**Предмет дослідження:** показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем.

**Методи дослідження.** В роботі використані загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних та експериментальних досліджень; методи математичної та статистичної обробки даних для моделювання досліджуваних параметрів; методи обчислювальної техніки при проведенні трудомістких розрахунків; методи математичного моделювання для визначення оптимальних характеристик досліджуваних систем та комп'ютерного моделювання для візуалізації отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі вперше визначено показники безпеки функціонування підкритичних систем з пластиковим сповільнювачем, доведено можливість застосування вторинного полімеру в якості сповільнювача швидких нейронів та встановлено залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень доцільно застосовувати при проектуванні дослідних та експериментальних підкритичних ядерних установок із значним збереженням матеріальних ресурсів за рахунок заміни традиційного сповільнювача.

**Апробація результатів дисертації.** Результати проведених досліджень оприлюднені у матеріалах I Науково-технічної конференції магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УДОСКОНАДЕННЯ СИСТЕМИ СПОВІЛЬНЕННЯ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ

Підкритичні системи, керовані зовнішнім джерелом нейтронів існують лише на етапі дослідних експериментальних установок, тому вони зазнають суттєвих модифікацій в цілях впровадження нехарактерних для промислових реакторів систем забезпечення технологічного процесу. Для успішної трансмутації відходів необхідно забезпечити сповільнення швидких нейтронів, що генеруються зовнішнім джерелом нейтронів. Енергія, з якою рухається нейтрон, є визначальним чинником впливу на результат взаємодії: швидкі нейтрони, що мають енергією більше 0,1 MeV, характеризуються меншим показником перерізу поділу в порівнянні із тепловими нейтронами, енергія яких близька до середньої енергії броунівського руху молекул газу при кімнатній температурі та становить 0,025 eV [1]. Необхідність змінювати енергію нейтрона підтверджується даними експериментальних досліджень, результати яких зведені у табл. 1.1. З табл. 1.1, де представлено показники перерізів взаємодії для ізотопів різних актинідів, що присутні у вивантаженому з реактора АЕС паливі, чітко видно, що тепловий нейтронний спектр набагато вигідніший для трансмутації цих ізотопів ніж швидкий [2].

Таблиця 1.1 – Значення перерізів поділу та радіаційного захоплення при різних спектрах нейтронів

Ізотопи	Тепловий спектр		Швидкий спектр	
	Переріз поділу	Переріз захоплення	Переріз поділу	Переріз захоплення
<sup>237</sup> Np	0,52	33	0,32	1,7
<sup>238</sup> Np	134	13,6	3,6	0,2
<sup>238</sup> Pu	2,4	27,7	1,1	0,58
<sup>239</sup> Pu	102	58,7	1,86	0,56
<sup>240</sup> Pu	0,53	210,2	0,36	0,57
<sup>241</sup> Pu	102,2	40,9	2,49	0,47
<sup>242</sup> Pu	0,44	28,8	0,24	0,44

Продовження таблиці 1.1

Ізотопи	Тепловий спектр		Швидкий спектр	
	Переріз поділу	Переріз захоплення	Переріз поділу	Переріз захоплення
$^{241}\text{Am}$	1,1	110	0,27	2
$^{242}\text{Am}$	159	301	3,2	0,6
$^{242\text{m}}\text{Am}$	596	137	3,3	0,6
$^{243}\text{Am}$	0,44	49	0,21	1,8
$^{242}\text{Cm}$	1,14	4,5	0,58	1
$^{243}\text{Cm}$	88	14	7,2	1
$^{244}\text{Cm}$	1	16	0,42	0,6
$^{245}\text{Cm}$	116	17	5,1	0,9
$^{235}\text{U}$	38,8	8,7	1,98	0,57
$^{238}\text{U}$	0,103	0,86	0,04	0,3

Таким чином, при тепловому спектрі нейтронів спостерігається більший переріз взаємодії як ділення так і радіаційного захоплення, що одночасно викликає два механізми трансмутації ВЯП: реакцію поглинання з утворенням короткоживучого або стабільного ядра та реакцію поділу.

Необхідною умовою для трансмутації є достатньо висока густина потоку нейтронів у реакторі. Для виконання цієї умови використовують прискорювачі, де відбувається реакція з виникненням 14 MeV нейтронів [3]. Оскільки дана енергія завелика для взаємодії з паливом, існує необхідність сповільнення нейтронів, тобто зменшення їх кінетичної енергії при переміщенні всередині активної зони. Оскільки конструкційні особливості підкритичних реакторів унеможливають використання традиційних сповільнювачів, потрібно дослідити матеріали, які забезпечуватимуть сповільнення та ефективність роботи підкритичних систем.

Традиційні сповільнювачі володіють рядом характеристик, що унеможливають їх використання у пропонованій підкритичній системі. Основними недоліками води є [4]:

- високий коефіцієнт розчинності сумішей, зокрема солей, в результаті чого відкладаючись на теплопередаючих поверхнях, осад

приводить до погіршення теплообміну, що викликає перегрівання оболонок тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ);

- низька температура кипіння, що зумовлює необхідність підвищення тиску у першому контурі;
- поглинання теплових нейтронів з утворенням дейтерію, що у промислових реакторах компенсують застосуванням ядерного палива на основі збагаченого урану.

Основними недоліками графіту є [4]:

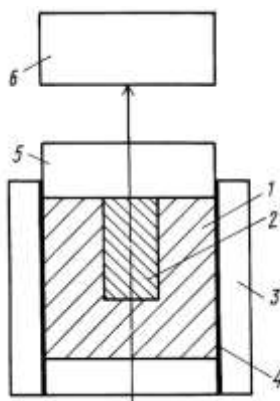
- висока вартість матеріалу ( $>10$  дол/кг), що зумовлена складністю та енергоємністю технології отримання реакторного графіту з суміші нафтового коксу і кам'яновугільної смоли;
- необхідність утримування графіту в енергетичних реакторах в атмосфері інертних газів (зазвичай, охолоджена графітоазотно-гелієва суміш), що дозволяє підняти температуру горіння графіту від  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- структурна зміна кристалічної решітки матеріалу при опроміненні в ядерному реакторі під дією швидких нейтронів (відбувається зсув атомів вуглецю із вузлів решітки), що пришвидшує фізичний знос обладнання.

### 1.1 Застосування пластикових сповільнювачів у радіаційному контролі

Застосування пластику широко поширене у сфері реєстрації потоків нейтронів та гама-випромінювання. Так, модель детектора для реєстрації нейтронів і гамма-випромінювання, розроблена науковцями Уральського державного технічного університету (рис. 1.1), призначена для цілей радіаційного моніторингу та дозволяє виявляти місця розташування джерел нейтронного випромінювання, що вимагають обліку і спектрометричного аналізу в системах технічного радіаційного контролю.

Коліматор, всередині якого міститься сцинтиляційний датчик з чутливим до гамма-випромінювання кристалом  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO), оточений двома оболонками: водневомісним сповільнювачем нейтронів – поліетиленом

(зовнішній шар) та кадмієвим поглиначем нейтронів (внутрішній шар). Поліетиленовий зовнішній шар двошарового коліматора сповільнює швидкі нейтрони до теплових енергій, якщо ці нейтрони надходять в датчик з бічних напрямків, кадмієвий внутрішній шар – поглинає теплові нейтрони, не допускаючи їх до центрального скінтілятора [5].

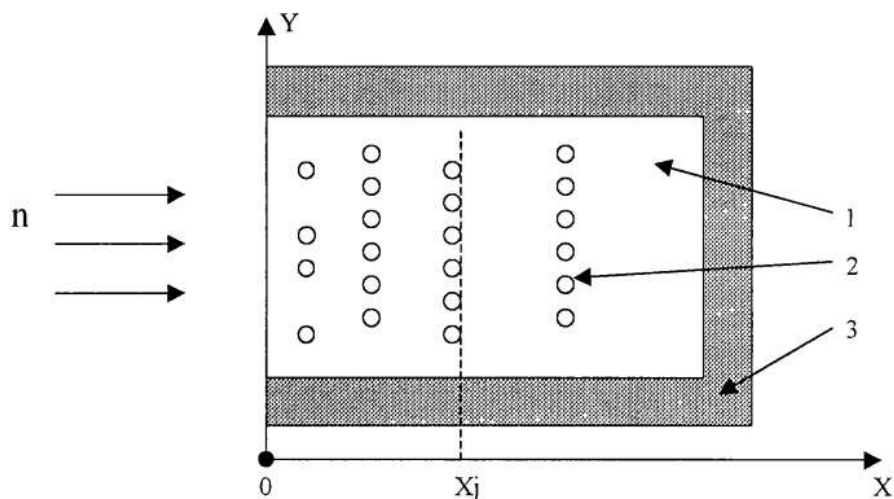


- 1 – кристал  $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ; 2 – колодязь з скінтіляційною речовиною;  
 3 – сповільнювач нейтронів; 4 – кадмієвий поглинач теплових нейтронів;  
 5 – фотопомножувач; 6 – блок електронної обробки сигналів

Рисунок 1.1 – Схема детектора для реєстрації нейтронів і гамма-випромінювання

Для визначення енергетичного розподілу спрямованого нейтронного випромінювання в діапазоні енергій нейтронів від теплових до швидких Федеральним державним унітарним підприємством «Науково-дослідний інститут імпульсної техніки» розроблено пристрій для детектування і спектрометрії нейтронів, датчики якого розміщені в матеріалі сповільнювача (від 1 см до 5 см для поліетилену), що збільшує ефективність використання нейтронних датчиків до 1,5 разів. Пристрій, що сприймає нейтронне випромінювання, оточений шаром сповільнювача нейтронів, що включає нейтронопоглинаючі добавки, наприклад бор. Товщина шару в напрямку потрапляння фонового та розсіяного випромінювання порівнянна або перевищує довжину релаксації нейтронів в даному матеріалі (для борованого

поліетилену – близько 6 см). На рис. 1.2 наведено варіант розміщення циліндричних нейтронних лічильників в монолітному прямокутному блоці сповільнювача нейтронів [6].



1 – блок-сповільнювач нейтронів; 2 – датчики теплових і повільних нейтронів;  
3 – шар матеріалу нейтронного захисту; n – нейтронне випромінювання

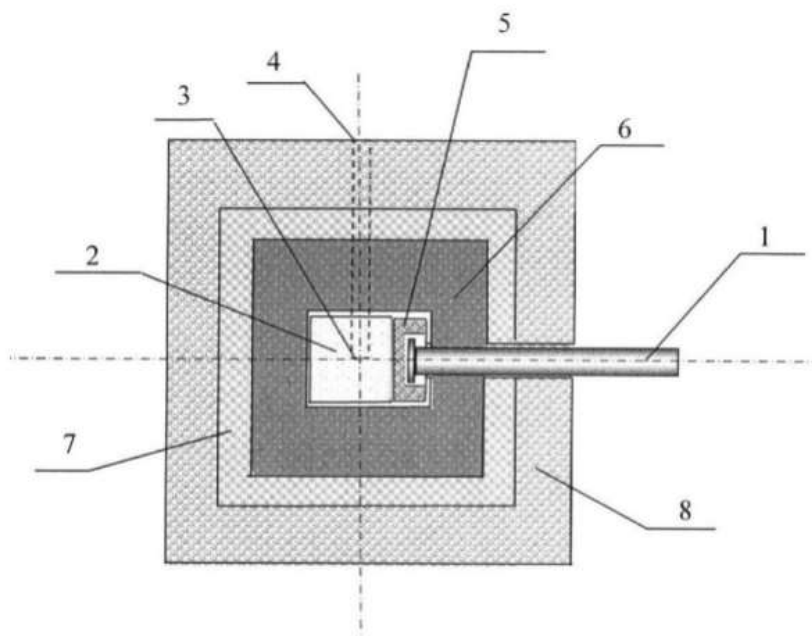
Рисунок 1.2 – Схема пристрою для детектування та спектрометрії нейтронів

Для аналізу об'єктів радіаційними методами за допомогою нейтронного випромінювання запропоновано пристрій, де джерело теплових нейтронів містить джерело швидких нейтронів і конвертер. При цьому блок-сповільнювач швидких нейтронів виконаний з поліетилену у вигляді куба, на поверхні якого послідовно розташовані конвертер-відбивач, захисний шар від гамма-випромінювання та захисний шар для поглинання теплових та швидких нейтронів (рис. 1.3). Таке технічне рішення дозволяє підвищити ефективність перетворення швидких нейтронів в теплові, а також зменшити розмір поліетиленової складової блоку-сповільнювача [7].

Випромінювальний пристрій облицьований матеріалом з великим перетином розсіювання теплових нейтронів – поліетиленом, сповільнювач в даному випадку виконується з берилію або графіту, захисний шар для поглинання теплових і швидких нейтронів виконаний з борованого



поліетилену. Гамма-випромінювання, що виникає в результаті непружного розсіювання теплових нейтронів в блоці-сповільнювачі, послаблюється в конвертері-відбивачі та додатково в шарі захисту з вісмуту, так як кількість народжених в ньому гамма-квантів через непружне розсіювання швидких нейтронів приблизно в 10 разів менше, ніж у свинцю.

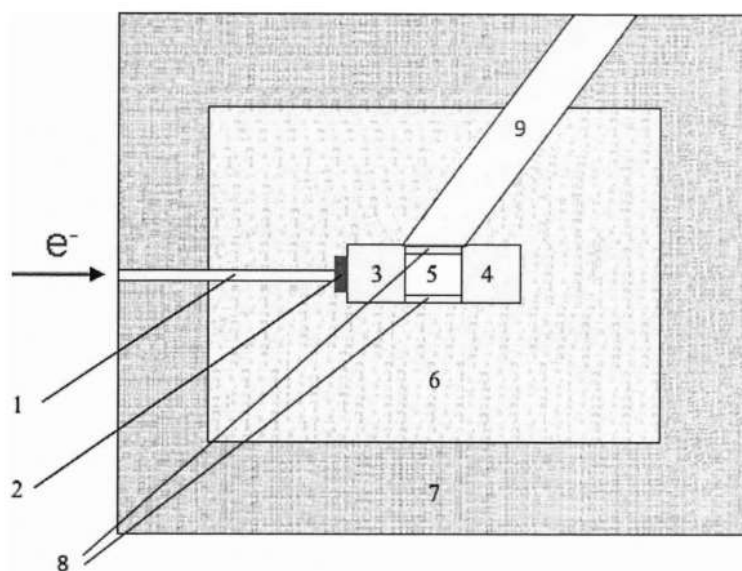


- 1 – джерело швидких нейтронів (ізотопне джерело або нейтронний генератор);  
 2 – поліетиленовий блок-сповільнювач швидких нейтронів; 3 – порожнина всередині куба; 4 – вхідний отвір для розміщення опромінюваних зразків;  
 5 – вольфрамовий конвертер; 6 – свинцевий конвертер-відбивач; 7 – захисний шар від гамма-випромінювання і нейтронного випромінювань; 8 – захисний шар з борованого поліетилену для поглинання теплових і швидких нейтронів

Рисунок 1.3 – Схема джерела теплових нейтронів

При проходженні швидких нейтронів через конвертер також відбувається їх непружне розсіювання, в результаті чого нейтрон втрачає енергію, що дозволяє зменшити розмір поліетиленового блоку-сповільнювача. Захисний шар з борованого поліетилену (вміст бору не менше 3 мас. %) товщиною 16 см поглинає теплові і швидкі нейтрони, що неконтрольовано вийшли з блоку-сповільнювача [7].

Застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів та біологічного захисту реалізоване при проектуванні фотонейтронного джерела, що може бути використано при нейтронно-активаційному аналізі матеріалів. Система включає в себе: канал для введення пучка електронів з енергією від 6 MeV до 8 MeV, вольфрамовий е- $\gamma$ -конвертер, дві фотонейтронні мішені (ФМ) з берилію, ємність для опромінення зразків, сповільнювач швидких нейтронів з поліетилену та біологічний захист з борованого поліетилену для теплових швидких нейтронів, що вилітають назовні з джерела. У біологічному захисті виконана порожнина, заповнена сповільнювачем. У центральній частині сповільнювача також виконана порожнина, в якій встановлені симетрично відносно її центру дві фотонейтронні мішені (рис. 1.4) [8].



- 1 – канал для введення пучка електронів; 2 – е- $\gamma$ -конвертер; 3 – перша ФМ;  
 4 – друга ФМ; 5 – порожнина для опромінення дослідних зразків;  
 6 – сповільнювач швидких нейтронів; 7 – біологічний захист для поглинання теплових та уповільнення і поглинання швидких нейтронів; 8 – бічні фотонейтронні мішені; 9 – канал для виведення нейтронів

Рисунок 1.4 – Схема фотонейтронного джерела

Сповільнювач та біологічний захист були створені зі стандартних фігурних блоків С0 (з чистого поліетилену) і С3 (з борованого поліетилену з

добавкою з'єднань бору із загальним вмістом не менш як 3 мас. %) з розмірами 250 мм×120 мм×60 мм, відповідно. Товщини біологічного захисту і сповільнювача при цьому склали не менше 16 та 24 см відповідно. Це забезпечило необхідний санітарними нормами рівень потоку нейтронів поза межами джерела [8].

У поліетиленовому сповільнювачі нейтрони зазнають зіткнення з ядрами водню, в результаті чого енергія нейтральної частинки знижується до енергії 0,07 еВ. Утворені теплові нейтрони з поліетиленового сповільнювача потрапляють в порожнину, де знаходяться зразки, що підлягають опроміненню. Шар біологічного захисту з борованого поліетилену з добавкою з'єднань бору, із загальним вмістом не менш як 3 мас. %, уповільнює швидкі нейтрони, а також поглинає теплові нейтрони, що вийшли за межі порожнини.

При моделюванні фотонейтронної берилієвої мішені отримані оптимальні параметри сповільнювача та біологічного захисту. Результати моделювання наведено на рис. 1.5.

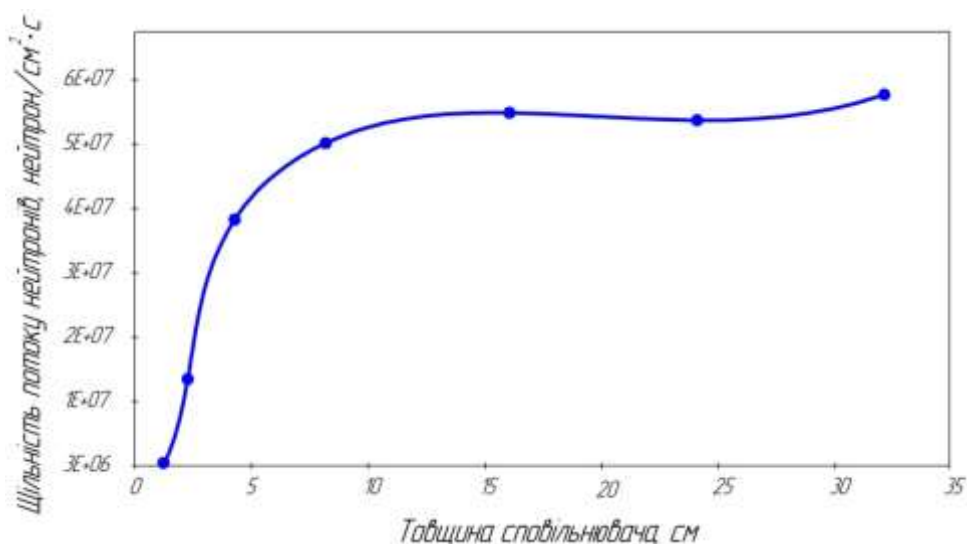


Рисунок 1.5 – Залежність щільності потоку нейтронів в центрі порожнини для опромінення зразків від товщини сповільнювача

На рис. 1.6 наведені результати моделювання взаємодії нейтронів з біологічним захистом з борованого поліетилену.

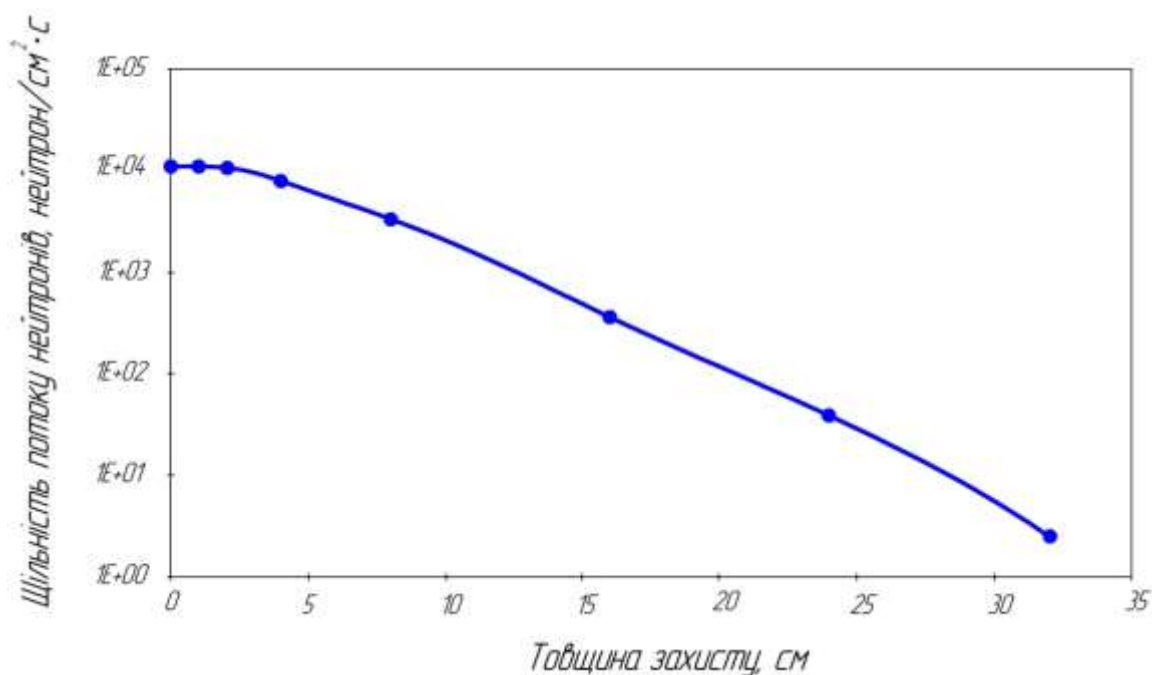


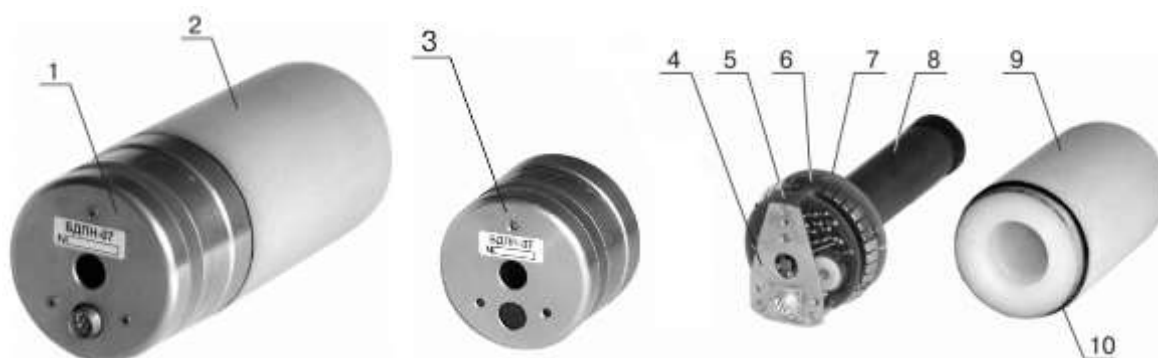
Рисунок 1.6 – Залежність щільності потоку нейтронів від товщини біологічного захисту з борованого поліетилену

Розрахунки показали можливість отримання густини потоку теплових нейтронів в порожнині для опромінення зразків близько  $10^8$ – $10^9$  нейтрон/с·см<sup>2</sup> при виході з першої фотонейтронної мішені та швидких нейтронів  $\sim 1$ – $5 \cdot 10^{10}$  нейтрон/с·см<sup>2</sup> при струмі пучка електронів  $\sim 30$  мкА.

## 1.2 Застосування пластикових систем сповільнення у підкритичних ядерних установках

Вивчення напрацювань попередників дозволило виявити моделі із застосуванням пластикового сповільнювача у підкритичних ядерних установках. Сповільнююча здатність пластику була застосована при розробці блоку детектування нейтронного випромінювання БДПН-08. Система призначена для виявлення джерел нейтронного випромінювання та вимірювання щільності потоку швидких та теплових нейтронів. Сповільнювач блоку детектування забезпечує виконання умов санітарного законодавства при пошуку джерела нейтронного випромінювання. Пластиковий сповільнювач

насувається на БДПН-08 та за допомогою різьби з'єднується із зовнішньою металічною оболонкою (рис. 1.7) [9].



- 1 – електронний блок; 2 – основний сповільнювач; 3 – металічна оболонка;  
 4 – монтажна планка; 5 – плата формувача високої напруги; 6 – плата  
 формувача вихідного сигналу з електростатичним екраном; 7 – ізолятор;  
 8 – детектор; 9 – поліетиленовий сповільнювач; 10 – гумова прокладка

Рисунок 1.7 – Конструкція блоку детектування нейтронного випромінювання  
 БДПН-08

В Об'єднаному інституті енергетичних і ядерних досліджень – Сосни НАН Білорусі в 2000 р. була введена в експлуатацію підкритична уран-поліетиленова збірка, керована генератором нейтронів для вивчення нейтронно-фізичних характеристик ADS [10]. У 2005 році була введена в експлуатацію швидко-теплова підкритична збірка, керована генератором нейтронів. До ядерно-фізичного стенду «ЯЛІНА» входять дві підкритичні збірки – «Яліна-Теплова» та «Яліна-Бустер», генератор нейтронів, вимірювальний комплекс і необхідні системи забезпечення функціонування роботи установок [11].

Згідно проекту підкритичної збірки «Яліна-Теплова», активна зона дослідної установки має форму прямокутного паралелепіпеда та складається з 24 поліетиленових паливних касет, в кожній з яких встановлені 16 паливних каналів з  $\text{UO}_2$  10%-го збагачення по  $^{235}\text{U}$ . У центрі активної зони розміщена свинцева мішень, що опромінюється протонами, в результаті чого утворюються

пучки нейтронів. Дана конструкція виконує роль зовнішнього джерела нейтронів. В якості відбивача використовується реакторний графіт.

Конструкція підкритичної збірки «Яліна-Теплова» дозволяє змінювати конфігурацію активної зони для отримання різних рівнів підкритичності (максимальне значення коефіцієнту розмноження  $k_{\text{eff}} < 0,975$ ) та використовувати різні зовнішні джерела нейтронів ( $^{252}\text{Cf}$ ;  $\text{D} (\text{D}, \text{n})$   $^3\text{He}$ ;  $\text{D} (\text{T}, \text{n})$   $^4\text{He}$ ), вивчаючи таким чином фізику та кінетику розмножуючих середовищ з швидким і тепловим спектрами нейтронів при різних рівнях підкритичності [12].

Проект підкритичної збірки «Яліна-Бустер» передбачає розподіл активної зони збірки на дві зони. Перша зона має жорсткий спектр швидких нейтронів, так звана «швидка зона» (енергія нейтронів  $E_n \sim 1 \text{ MeV}$ ), друга зона має характерний спектр теплових нейтронів (теплова зона). Ці дві зони конструктивно розділені зоною поглинача теплових нейтронів (природний металевий уран і  $\text{B}_4\text{C}$ ) для забезпечення одностороннього нейтронного зв'язку між зонами. Швидка зона складається з 36 свинцевих паливних касет, тепла – із 108 поліетиленових паливних касет з твелями ЕК-10. У центрі збірки є порожнина квадратного перетину для розміщення свинцевої мішені [13].

Бічні поверхні активної зони оточені графітовим відбивачем та шаром органічного скла, по торцях збірка оточена блоками з борованого поліетилену. В ході проведення експериментальних досліджень був реалізований ряд конфігурацій активної зони підкритичної збірки «Яліна-Бустер», що відрізняються рівнем збагачення використаного палива в швидкій зоні, а також геометричною конфігурацією проміжної зони. У швидкій і проміжній зонах з прямокутною конфігурацією досліджувалася залежність нейтронно-фізичних властивостей від збагачення палива, що завантажується в швидку частину активної зони, у тепловій і проміжній зонах з кільцевою конфігурацією досліджувалися нейтронно-фізичні властивості теплової частини активної зони [14].

Таким чином, практичний досвід застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів досить поширений. Однак практично недослідженою залишається можливість оптимізації підкритичних ядерних реакторів з точки зору застосування в якості сповільнювача синтетичних або природних полімерів, що піддавалися методам утилізації.

## Висновки до розділу 1

1. Визначено необхідні умови для трансмутації відходів ядерної енергетики, виявлено, що тепловий спектр нейтронів (енергія яких становить 0,025 еВ) дозволяє трансмутувати відпрацьоване ядерне паливо одночасно реакціями поглинання та реакціями поділу. Доведено необхідність сповільнення швидких нейтронів в підкритичних ядерних установках, що керовані зовнішнім джерелом нейтронів.

2. Проаналізовано традиційні матеріали, що застосовуються у вітчизняних системах сповільнення, визначено основні недоліки та обґрунтовано неможливість використання традиційних систем сповільнення у підкритичних реакторах.

3. Наведено доцільність проведення дослідження можливості застосування пластику в якості сповільнювача в підкритичних системах, досліджено існуючий теоретичний та практичний досвід застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів, виявлено відсутність розробок, що засновані на використанні пластику, який піддавався утилізації.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПІДКРИТИЧНОГО РЕАКТОРА ІЗ ПЛАСТИКОВИМ СПОВІЛЬНЮВАЧЕМ

Одним із способів дослідження впливу комплексу чинників на складну технологічну систему є моделювання на основі відомих фізичних та математичних залежностей. Оскільки експериментальне дослідження підкритичних систем в межах України здійснюють лише у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» в умовах конфіденційності [15], моделювання, в даному випадку, – єдино можливий спосіб вивчення технологічних процесів.

### 2.1 Вибір параметрів моделювання

Для отримання адекватних результатів необхідно врахувати ряд факторів, що безпосередньо або опосередковано впливають на фізичні процеси, які відбуваються в реакторі. Основними параметрами, що визначають роботу підкритичної ядерної установки є:

- тип теплоносія, що циркулює у технологічних контурах реакторної установки;
- тип полімеру, з якого виготовлено сповільнювач швидких нейронів;
- геометричні розміри підкритичного реактора.

Для визначення оптимальних параметрів роботи підкритичного реактора необхідно провести розрахунковий аналіз можливості створення самопідтримуючої ланцюгової реакції поділу ядер урану у відпрацьованих збірках, здійснити математичне та комп'ютерне моделювання процесів, що визначають доцільність застосування підкритичної ядерної установки у промислових цілях.

Вибір матеріалу сповільнювача. Полімери володіють рядом характеристик, що задовольняють вимоги безпечного використання їх у екстремальних умовах підкритичних реакторів. Коефіцієнт теплопровідності



полімерів значно нижче, ніж інших твердих тіл, від 0,2 В/(м·К) до 0,3 В/(м·К), що визначає їх теплоізоляційні властивості [16]. Вони характеризуються високим ступенем ковзання і зносостійкості, можуть експлуатуватися в умовах надвисоких температур і підвищеної вологості.

Необхідною умовою сповільнення швидких нейтронів є наявність ядер з високою розсіюючою здатністю та невеликим перерізом поглинання нейтронів. Вказаними характеристиками володіють елементи, що розташовані у верхній частині таблиці Менделєєва, в тому числі карбон та водень, що є складовими пластиків. Важливо також уникати у складі сповільнювача елементів, що можуть спричиняти корозію конструкцій реактора.

Для розрахунку моделі еталонного підкритичного реактора із зовнішнім джерелом нейтронів необхідно визначитись із типом полімеру, що буде застосовуватись в якості сповільнювача. Для цього проведено порівняльний аналіз серед наступних груп полімерів: поліетилентерефталат (ПЕТФ), поліетилен низького тиску або високої густини (ПНТ), поліпропілен (ПП) та полістирол (ПС).

Поліетилентерефталат (ПЕТФ) – один з полімерів групи технічних термопластиків, виготовляється із етиленгліколю в поєднанні із терефталевою кислотою. Середній діапазон робочих температур ПЕТФ становить від -60 °С до 170 °С. ПЕТФ піддається термодеструкції при температурному діапазоні від 290 °С до 310 °С. Летючими продуктами є терефталева кислота, оцтовий альдегід і монооксид вуглецю. При витримці у воді при 25 °С протягом тижня матеріал поглинає менше 0,5 об. % води [17].

ПНТ стійкий до дії органічних розчинників, кислот та лугів. При підвищенні щільності зростає стійкість по відношенню до більшості органічних розчинників. Однак поліетилен має низький поріг міцності на розтяг, а також схильний до старіння, що зумовлює зростання показника крихкості [18].

Поліпропілен – органічна сполука з групи поліолефінів, яку отримують методом полімеризації пропілену. Полімеризацію проводять при тиску 10 атмосфер та температурі до 80 °С. В порівнянні із поліетиленами, поліпропілен

володіє меншою щільністю, більшим показником твердості, синтетична сполука є більш термостійкою та практично не піддається корозійному впливу. [19].

Полістирол – термопластичний аморфний синтетичний полімер, який є продуктом полімеризації стиролу, що утворюється при взаємодії вуглеводню етилену з ароматичним радикалом фенілу. Полістирол характеризується високою твердістю та діелектричними властивостями. Важливо відмітити, що даний полімер є стійким до радіоактивного опромінення [20].

Таким чином для вибору оптимального матеріалу, що застосовуватиметься в якості сповільнювача у еталонному підкритичному реакторі проведено порівняння сповільнювачів методом ієрархій за Т. Сааті, дані для розрахунку наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики матеріалів сповільнювачів

№ п/п	Матеріал	Показник			
		Температура плавлення, °C	Міцність на розтяг, МПа	Коефіцієнт теплового розширення, град-1	Теплопровідність, Вт/(м·К).
1	Полістирол	102	160	0,000022	0,2
2	ПЕТФ	255	200	0,000655	0,14
3	Поліпропілен	165	172	0,0003	0,22
4	ПНД	170	350	0,0000045	0,09

Для кожного критерія оцінки ( $P$ ) призначено характеристику ( $H$ ). За бальною системою оцінювалась важливість кожної характеристики для усіх критеріїв оцінки. Бали, що визначають ступінь важливості показника присвоювались у відповідності до величин економічних витрат, які передбачаються із масштабів аварійних ситуацій, що виникають при нехтуванні кожною характеристикою. Наближена вартість заміни деформованих конструкцій наведено в табл. 2.2 [21]–[22].

Таблиця 2.2 – Вартість заміни деформованих конструкцій

Фактор впливу	Наслідок	Заходи по усуненню	Вартість заходів
Температура плавлення	Розплавлення сповільнювача, втрата геометрії активної зони, зменшення прохідного перерізу теплоносія, погіршення охолодження ТВЕЛів, їх розігрів з подальшим плавленням, вихід радіоактивностей за межі технологічного контуру	Позапланова аварійна зупинка реактора, виведення його з експлуатації, ліквідація наслідків техногенної аварії	близько 8 млрд \$
Міцність на розтяг	Втрата герметичності активної зони, вихід високоактивного теплоносія за межі технологічного контуру	Проведення робіт по знезараженню забруднених елементів конструкції, здійснення ремонтних робіт по усуненню дефектів	близько 2,3 млрд \$
Коефіцієнт теплового розширення	Збільшення розмірів активної зони, збільшення навантаження на кріпильні елементи, їх пошкодження	Заміна кріпильних елементів	близько 3,6 млн \$
Теплопровідність	Збільшення втрат корисної теплоти в оточуюче середовище	Теплоізоляція оболонки реактора	близько 57 000 \$

Таким чином, встановлено, що найбільш важливим показником, якому присвоєно найвищий бал (4) є температура плавлення сповільнювача. Даний метод дозволив обрати критерій, що найбільше відповідає характеристикам  $H$  (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розподіл балів серед показників

№ п/п	Критерії	Показники			
		Температура плавлення, °C	Міцність на розтяг, МПа	Коефіцієнт теплового розширення, град-1	Теплопровідність, Вт/(м·К)
		$\alpha^1_0 = 4$	$\alpha^2_0 = 3$	$\alpha^3_0 = 2$	$\alpha^4_0 = 1$
1	Полістирол	$\alpha^1_1 = 1$	$\alpha^2_1 = 1$	$\alpha^3_1 = 3$	$\alpha^4_1 = 2$
2	ПЕТФ	$\alpha^1_2 = 4$	$\alpha^2_2 = 3$	$\alpha^3_2 = 1$	$\alpha^4_2 = 3$
3	Поліпропілен	$\alpha^1_3 = 2$	$\alpha^2_3 = 2$	$\alpha^3_3 = 2$	$\alpha^4_3 = 1$
4	ПНД	$\alpha^1_4 = 3$	$\alpha^2_4 = 4$	$\alpha^3_4 = 4$	$\alpha^4_4 = 4$

За присвоєними значеннями, що наведені у табл. 2.3, проведено розрахунок відносного ступеня важливості характеристик критеріїв оцінки при виборі матеріалу сповільнювача. Для порівняння характеристик за аналогією з табл. 2.3 складено матриці табл. 2.4 – 2.8. Загальний ступінь важливості критеріїв оцінки ( $N$ ) залежить від ступеня важливості характеристик ( $M$ ) та розраховується:

$$N_1 = M_1^1 M_0^1 + M_1^2 M_0^2 + M_1^3 M_0^3. \quad (2.1)$$

Визначення вагових коефіцієнтів ( $C$ ) для аналізованих матеріалів та ступеню важливості здійснюється за формулами:

$$C = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n A}, \quad (2.2)$$

$$M = \frac{C_i}{\sum C_i}. \quad (2.3)$$

Отримані значення заносимо до таблиць-матриць.

Таблиця 2.4 – Аналіз характеристик та визначення їх ступеня важливості

№ п/п	Матеріал	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	Вага характеристи ки ( $C$ )	Ступінь важливості характеристи ки ( $M$ )
1	Полістирол	1,0000	1,3333	2,0000	4,0000	3,2660	0,5333
2	ПЕТФ	0,7500	1,0000	1,5000	3,0000	1,8371	0,3000
3	Поліпропілен	0,5000	0,6667	1,0000	2,0000	0,8165	0,1333
4	ПНД	0,2500	0,3333	0,5000	1,0000	0,2041	0,0333
	Сума	-	-	-	-	6,1237	1,0000

Таблиця 2.5 – Аналіз характеристик критеріїв оцінки та визначення їх ступеня важливості при виборі сповільнювача за першим критерієм

№ п/п	Матеріал	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	Вага характеристи ки (C)	Ступінь важливості характеристи ки (M)
1	Полістирол	0,2500	0,2500	0,7500	0,5000	0,1531	0,0975
2	ПЕТФ	1,0000	0,7500	0,2500	0,7500	0,3750	0,2387
3	Поліпропілен	0,5000	0,5000	0,5000	0,2500	0,1768	0,1125
4	ПНД	0,7500	1,0000	1,0000	1,0000	0,8660	0,5513
	Сума	-	-	-	-	1,5709	1,0000

Таблиця 2.6 – Аналіз характеристик критеріїв оцінки та визначення їх ступеня важливості при виборі сповільнювача за другим критерієм

№ п/п	Матеріал	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	Вага характеристи ки (C)	Ступінь важливості характеристи ки (M)
1	Полістирол	0,3333	0,3333	1,0000	0,6667	0,2722	0,0975
2	ПЕТФ	1,3333	1,0000	0,3333	1,0000	0,6667	0,2387
3	Поліпропілен	0,6667	0,6667	0,6667	0,3333	0,3143	0,1125
4	ПНД	1,0000	1,3333	1,3333	1,3333	1,5396	0,5513
	Сума	-	-	-	-	2,7927	1,0000

Таблиця 2.7 – Аналіз характеристик критеріїв оцінки та визначення їх ступеня важливості при виборі сповільнювача за третім критерієм

№ п/п	Матеріал	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	Вага характеристи ки (C)	Ступінь важливості характеристи ки (M)
1	Полістирол	0,5000	0,5000	1,5000	1,0000	0,6124	0,0975
2	ПЕТФ	2,0000	1,5000	0,5000	1,5000	1,5000	0,2387
3	Поліпропілен	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000	0,7071	0,1125
4	ПНД	1,5000	2,0000	2,0000	2,0000	3,4641	0,5513
	Сума	-	-	-	-	6,2836	1,0000

Таблиця 2.8 – Аналіз характеристик критеріїв оцінки та визначення їх ступеня важливості при виборі сповільнювача за четвертим критерієм

№ п/п	Матеріал	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	Вага характерист ики ( $C$ )	Ступінь важливості характеристи ки ( $M$ )
1	Полістирол	1,0000	1,0000	3,0000	2,0000	2,4495	0,0975
2	ПЕТФ	4,0000	3,0000	1,0000	3,0000	6,0000	0,2387
3	Поліпропілен	2,0000	2,0000	2,0000	1,0000	2,8284	0,1125
4	ПНД	3,0000	4,0000	4,0000	4,0000	13,8564	0,5513
	Сума	-	-	-	-	25,1343	1,0000

Розраховані значення ступеня важливості кожного матеріалу:  $N_1 = 0,0975$ ;  $N_2 = 0,2387$ ;  $N_3 = 0,1125$ ;  $N_4 = 0,5513$ .

Таким чином, результати аналізу методом ієрархій вказують на ефективність застосування в якості сповільнювача швидких нейтронів поліетилену низького тиску. Важливо врахувати також коефіцієнт сповільнення нейтронів кожної речовини, що розраховується за формулою:

$$k_{cn} = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a}, \quad (2.4)$$

де  $\xi$  – середньологарифмічний декремент енергії, в.о

$\Sigma_s$  – макроскопічний переріз розсіювання,  $\text{см}^{-1}$ ;

$\Sigma_a$  – макроскопічний переріз поглинання,  $\text{см}^{-1}$  [23].

Добуток вищеописаних показників визначає сповільнюючу здатність речовини. Середньологарифмічний декремент енергії розраховується:

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}, \quad (2.5)$$

де  $A$  – масове число ядра-розсіювача [23].

Макроскопічний переріз розсіювання в  $\text{см}^{-1}$  визначається за формулою:

$$\Sigma_s^i = \sum_{i=1}^n \sigma_s \cdot N^i, \quad (2.6)$$

де  $\sigma_s$  – мікроскопічний переріз розсіювання речовини, барн;

$N^i$  – концентрація речовини,  $1/\text{см}^3$  [24].

Макроскопічний переріз поглинання в  $\text{см}^{-1}$  визначається за формулою:

$$\Sigma_a^i = \sum_{i=1}^n \sigma_a \cdot N^i, \quad (2.6)$$

де  $\sigma_a$  – мікроскопічний переріз поглинання речовини, барн;

$N^i$  – концентрація речовини,  $1/\text{см}^3$  [24].

Показники перерізів розсіювання та перерізів поглинання наведено у табл. 2.9 [25].

Таблиця 2.9 – Мікроскопічні перерізи розсіювання та поглинання речовин

Речовина	Переріз розсіювання $\sigma_s$ , барн	Переріз поглинання $\sigma_a$ , барн
Карбон	4,74	0,0034
Гідроген	20,73	0,0142
Оксиген	3,8	0,022

Проведемо розрахунок для поліетилентерефталату. Масове число ядра-розсіювача становить:

$$A_{C_{10}H_8O_4} = \frac{10 \cdot 12 + 8 \cdot 1 + 4 \cdot 16}{22} = 8,727.$$

Середньологарифмічний декремент енергії:

$$\xi = 1 + \frac{(8,727 - 1)^2}{2 \cdot 8,727} \ln \frac{8,727 - 1}{8,727 + 1} = 0,2125.$$

Коефіцієнт сповільнення для ПЕТФ:

$$k_{cn} = \frac{0,2125 \cdot (10 \cdot 4,74 + 8 \cdot 20,73 + 4 \cdot 3,8)}{(10 \cdot 0,0034 + 8 \cdot 0,0142 + 0,022)} = 206,04.$$

Аналогічно розраховано величини для оцінюваних матеріалів, результати занесено до табл. 2.10 та наведено рис. 2.1.

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку для матеріалів

Матеріал	A	$\xi$
ПЕТФ	8,727	0,2125
ПНТ	4,66	0,373
Полістирол	6,5	0,2782
Поліпропілен	4,767	0,373

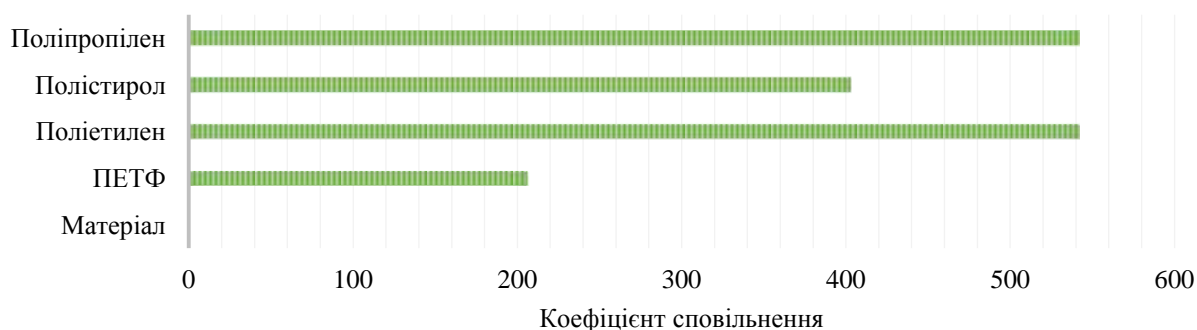


Рисунок 2.1 – Величина коефіцієнту сповільнення для оцінюваних матеріалів



Як видно із графіку, показники сповільнення для поліпропілену та поліетилену низького тиску практично однакові, однак аналіз методом ієрархій дозволяє обрати для моделювання підкритичного реактору раціональний матеріал – ПНТ.

Вибір типу теплоносія. Теплоносії повинні володіти наступними специфічними характеристиками: низькою корозійною агресивністю до матеріалів, що використовуються у реакторах, високою теплоємністю, високою теплопровідністю, малою в'язкістю, високою температурою кипіння або низькою температурою плавлення (для рідкометалевих теплоносіїв), високою термостійкістю, високою радіаційною стійкістю, малим перерізом поглинання нейтронів, малою наведеною радіоактивністю, пожежовибухобезпечністю, негорючістю та не токсичністю [26].

Водні носії тепла у вигляді легкої води  $\text{H}_2\text{O}$  загалом застосовуються в реакторах на теплових нейтронах, в них вона виступає також в якості сповільнювача, оскільки має значний переріз поглинання нейтронів. Проте тиск насиченої водяної пари, який поступово збільшується із зростанням температури, зумовлює необхідність включення в процес виробітку тепла потужних контурів циркуляції з робочим тиском від 17 МПа до 20 МПа, що підвищує вартість ядерної енергетичної установки і ускладнює її експлуатацію [4]. Необхідність забезпечити високу якість води в контурах вимагає встановлення багатоступеневих водоочисних установок.

Важка вода  $\text{D}_2\text{O}$  також застосовується в ядерних установках на теплових нейтронах, оскільки має найбільший коефіцієнт сповільнення теплових нейтронів. Вміст важкої води в звичайній воді складає 0,017 об. %, що приблизно відповідає вмісту однієї молекули  $\text{D}_2\text{O}$  в 7000 молекулах  $\text{H}_2\text{O}$  [4].

Для отримання важкої води в промисловості застосовують три способи: дистиляція, хімічний обмін і електроліз. Однак, висока вартість її виробництва зумовлює використання в реакторах дешевшу, але менш чисту важку воду, що містить до 10 об. % звичайної води в якості домішки. Недоліком водних теплоносіїв є високий рівень сприйняття радіоактивності, що утворюється при

роботі реактора. В процесі роботи АЕС радіоактивність водних теплоносіїв збільшується, оскільки стають активними атоми кисню, що належать  $\text{H}_2\text{O}$  або  $\text{D}_2\text{O}$  [27].

Рідкі метали в якості теплоносіїв застосовуються в реакторах на швидких та теплових нейтронах. У таких теплоносіїв відсутня залежність зміни температури кипіння від тиску. Опромінення не викликає в рідких металах явищ, схожих до радіолізу води. Рідкометалеві теплоносії володіють низьким показником тиску насиченої пари, високою термічною і радіаційною стійкістю. Недоліками рідких металів є порівняно низька об'ємна теплоємність та фазове перетворення в твердий стан при температурі навколишнього середовища. Однак вказані перешкоди усуваються системою підігріву металів.

Натрій – найбільш застосовуваний метал серед рідкокристалічних теплоносіїв. Досить низька температура плавлення, достатні теплопередавальні властивості та низькі енергетичні витрати на його використання дозволяють розглядати натрій як перспективний матеріал в якості теплоносія [27].

Свинець та вісмут в якості рідкометалевих теплоносіїв застосовуються рідко, однак їх евтектика, що містить 44,5 % Pb і 55,5 % Bi широко використовується у дослідних реакторних установках. Температура плавлення такого сплаву становить 125 °C. Теплофізичні та хімічні властивості даного сплаву близькі до середніх показників його компонентів. Теплоносії із свинцю та вісмуту володіє високою корозійною стійкістю до температур від 500 °C до 550 °C [28].

Газові теплоносії характеризуються відносно невеликим показником поглинання теплових нейтронів, однак низькі значення їх об'ємних теплоємностей, густин та коефіцієнтів теплопровідності зумовлюють необхідність великих об'ємів таких матеріалів в технологічних контурах. Однак, порівняно нижча теплоємність ніж у вуглекислого газу та необхідність підтримування у циркуляційному контурі тиску близько від 20 МПа до 25 МПа ускладнює використання гелієвого теплоносія [27]. До недоліків гелію

відносять його текучість, що зумовлює підвищену увагу до герметизації контурів реакторів.

Для того, щоб вибрати серед описаних теплоносіїв найбільш раціональний, необхідно розглянути ряд основних критеріїв вибору, порівняти їх та обрати найкращий варіант. Для вирішення задач такого типу доцільно використовувати інструмент Пошук розв'язку табличного процесора Excel в задачах лінійного програмування.

Потрібно знайти оптимальний теплоносій, тобто визначити який із запропонованих варіантів характеризуватиметься задовільними необхідні ядерно-фізичними та теплогідравлічними показниками, а також забезпечить надійний тепловідвід та безпечну експлуатацію ядерної установки. Для кожного із сповільнювачів відомі температури плавлення, переріз поглинання теплових нейтронів при температурі за нормальних умов та температура плавлення сповільнювача, що є основною характеристикою вибору (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Вихідні параметрами для розрахунку

Теплоносій	Показники		
	Температура плавлення теплоносія, $T_{пл}^{тп}$ (К)	Температура плавлення сповільнювача, $T_{пл}^{сп}$ (К)	Переріз поглинання теплових нейтронів за н.у., $см^{-1}$
Легка вода	273	407	0,66419
Важка вода	276,8		0,00696
Рідкий натрій	370,8		0,0052
Сплав свинцю та вісмуту	398		0,08054
Гелій	0,8		0,075

Побудова математичної моделі.

1. Введено такі позначення змінних:  $X_{ij}$  —  $j$ -тий показник  $i$ -го сповільнювача,  $i = 1,2,3,4,5$ ;  $j = 1,2,3$ .

2. Визначено макроскопічний переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі,  $см^{-1}$ :

$$\Sigma_a^t = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_p}} \cdot \Sigma_a, \quad (2.7)$$

де  $T$  – температура за нормальних умов, 293 К;

$T_p$  – робоча температура, К [34].

3. Цільова функція має вигляд:  $f(x) = \Sigma_a^t \rightarrow \min$ .

4. Система обмежень з умов поставленої задачі:

а) максимальна робоча температура теплоносія всередині реактора не повинна перевищувати температуру плавлення сповільнювача з урахуванням запасу в 25 °С:

$$T_p < T_{nl}^{cn} - 25^\circ\text{C}; \quad (2.8)$$

б) мінімальна робоча температура теплоносія всередині реактора повинна перевищувати температуру плавлення теплоносія з урахуванням запасу в 15 °С:

$$T_p < T_{nl}^{mn} + 15^\circ\text{C}; \quad (2.9)$$

в) переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі не може бути від'ємним:

$$\Sigma_a^t \geq 0. \quad (2.10)$$

Розв'язання задачі.

1. Значення змінних  $X_{ij}$  містяться в діапазоні B3:D7. Діапазон розрахованих робочих температур для кожного типу теплоносія міститься в чарунках F3:G7.

2. В діапазоні чарунок J3:J7 введено цільову функцію. Таким чином для кожного теплоносія необхідно визначити оптимальну робочу температуру при якій переріз поглинання теплових нейтронів в реакторі буде мінімальний.

3. Через функцію «Пошук рішень» введено обмеження:

а)  $F3:F7 > I3:I7$ ;

б)  $G3:G7 < I3:I7$ ;

в)  $J3:J7 \geq 0$ .

На рис. 2.2 та рис. 2.3 вказані вихідні параметри для проведення розрахунків та введення обмежуючих факторів відповідно.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Тип теплоносія	Температура кипіння (для рідин) та плавлення для твердих теплоносіїв, К	Температура кипіння/плавлення, К	Переріз поглинання теплових нейтронів при температурі та тиску, бари	Обмеження	$> T_{\text{кип}} - 15^\circ\text{C}$	$< T_{\text{пл}} - 25^\circ\text{C}$	Робоча температура, К	Робоча температура, К	Переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі, бари
2	Легка вода	273	463	0,06419		288	438			0
3	Важка вода	276,8		0,00696		291,8				0
4	Рідинний натрій	370,8		0,0052		385,8				0
5	Сплав свинцю та висмуту	358		0,080535		413				0
6	Гелій	0,8		0,075		15,8				0

Рисунок 2.2 – Таблиця для розв'язання задачі

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До: ☐ Максимум ☒ Минимум ☐ Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

$B3:B7 \leq G3:G7$   
 $B3:B7 \geq F3:F7$

☒ Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Метод решения  
 Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Дробить  
 Изменить  
 Удалить  
 Сбросить  
 Загрузить/сохранить

☒ Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Справка

Найти решение

Закрыть

Рисунок 2.3 – Умови оптимізації цільової функції

4. Через «Пошук рішення» визначено оптимальний розв'язок поставленої задачі (рис. 2.4):

- для легкої води отримано чисельне значення 0,58;
- для важкої води отримано чисельне значення 0,006;
- для рідкого натрію отримано чисельне значення 0,0053.
- для сплаву свинцю та вісмуту отримано чисельне значення 0,0847.
- для гелію отримано чисельне значення 0,0154.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Тип теплоносія	Характеристики			Обмеження	Робоча температура, К		Рішення	Робоча температура, К	Переріз поглинання теплових нейтронів при робочій температурі в реакторі, бари
2		Температура кипіння (для рідин) та плавлення для твердих теплоносіїв, К	Температура плавлення сповільнювача, К	Переріз поглинання теплових нейтронів при температурі за н.у. бари		$> T_{\text{н}}^{\text{н}} + 15^{\circ}\text{C}$	$< T_{\text{н}}^{\text{н}} - 25^{\circ}\text{C}$			
3	Легка вода	273	463	0,66419		288	438		288	0,583431126
4	Важка вода	276,8		0,00696		291,8			291,8	0,006153935
5	Рідкий натрій	370,8		0,0052		385,8			385,8	0,00528671
6	Сплав свинцю та вісмуту	398		0,080533		413			413	0,084715076
7	Гелій	0,8		0,075		15,8			15,8	0,015430885

Рисунок 2.4 – Рішення оптимізаційної задачі

Таким чином, для підкритичного реактора, керованого зовнішнім джерелом нейтронів в якості сповільнювача доцільно застосовувати рідкий натрій.

Розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора з пластиковим сповільнювачем. Для розрахунку геометричних розмірів підкритичної ядерної установки застосовано програмний комплекс Winfrith Improved Multigroup Scheme (WIMS) – загальна програма розрахунку чарунок решітки реактора, яка дозволяє на основі теорії переносу нейтронів розрахувати потік нейтронів в залежності від енергії і розміщення чарунки [29]–[31].

Для проведення нейтронно-фізичного розрахунку створено розрахункову модель, яка включає у себе чотири області (рис. 2.5):

- область 1 – паливо  $\text{UO}_2$ , радіус області палива  $r_1 = 0,38$  см;
- область 2 – оболонка  $\text{Zr}+1\%\text{Nb}$ , радіус зовнішньої поверхні  $r_2 = 0,455$  см;

- область 3 – теплоносій Na.
- область 4 – сповільнювач  $(C_2H_4)_n$ .

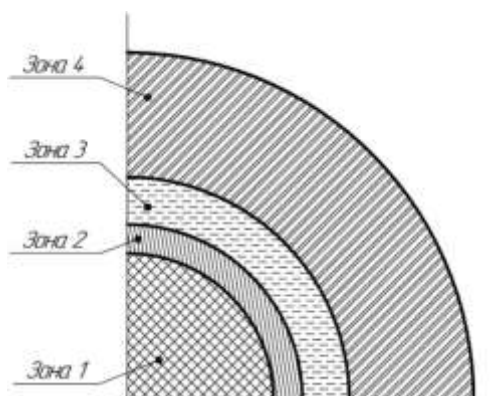


Рисунок 2.5 – Розрахункові області моделі

Радіус області 3 залежить від кроку розташування ТВЕЛ в паливній касеті та розраховується за формулою:

$$r_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi}} \cdot \frac{t}{2} = 0,668 \text{ см}, \quad (2.11)$$

де  $t$  – крок розміщення ТВЕЛ, 12,75 мм [32].

Визначення оптимального радіусу кільця зони 4, при якому забезпечується найефективніша робота реактору, є основною задачею даного нейтронно-фізичного розрахунку. Якісним показником ефективності роботи реактору є ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів.

Для проведення розрахунку залежності ефективного коефіцієнту розмноження нейтронів від товщини шару сповільнювача між технологічними каналами, потрібно перевести цю товщину в еквівалентний їй радіус зони 4 в міліметрах за формулами:

$$h = \delta + 2 \cdot R_{m.k.}, \quad (2.12)$$

$$r_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi}} \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.13)$$

де  $\delta$  – товщина сповільнювача, мм;

$R_{m.k.}$  – радіус технологічного каналу, що залежить від розміру «під ключ» тепловиділяючої збірки (ТВЗ), мм;

$h$  – крок розташування технологічних каналів, мм [32].

Для шестигранної ТВЗ реактора ВВЕР-1000 розмір „під ключ” обчислюється:

$$h_K = (d_{ц.т.}^{зоб.} + 20t + d_{ТВ}) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = (0,0112 + 20 \cdot 0,01275 + 0,0091) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0,234 \text{ м}, \quad (2.14)$$

де  $d_{ц.т.}^{зоб.}$  – зовнішній діаметр центральної трубки для ТВЗ ВВЕР-1000, 0,0112 м;

$t$  – крок ТВЕЛів в решітці ТВЗ, 0,01275 м;

$d_{ТВ}$  – зовнішній діаметр ТВЕЛ, 0,0091 м [32].

$$R_{m.k.} = \frac{h_k}{\sqrt{3}} = 0,137 \text{ м}. \quad (2.15)$$

В табл. 2.12 наведено отримані розрахунковим шляхом товщини сповільнювача.

Таблиця 2.12 – Взаємозалежність товщини сповільнювача між технологічними каналами, кроку між ними та радіусу зони 4

Товщина шару сповільнювача між технологічними каналами $\delta$ , мм	Крок розташування технологічних каналів, $h$ , мм	Радіус зони 4, $r_4$ , мм
0	238	124,96
10	248	130,21
20	258	135,46



Продовження таблиці 2.12

Товщина шару сповільнювача між технологічними каналами $\delta$ , мм	Крок розташування технологічних каналів, $h$ , мм	Радіус зони 4, $r_4$ , мм
30	268	140,71
40	278	145,96
50	288	151,21
60	298	156,46
70	308	161,71
80	318	166,96
90	328	172,21
100	338	177,46

Приступаючи до обчислення ізотопного складу ВЯП, необхідно визначити які ізотопи з тієї кількості, які з'являються в ВЯП внаслідок ланцюгової реакції, найбільш значущі з точки зору обліку ядерно небезпечних матеріалів та оцінки розмножуючих властивостей палива. Тому для подальшого аналізу модель обмежена наступними паливними ізотопами та актиноїдами:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  (табл. 2. 13).

Таблиця 2.13 – Вміст паливних ізоотопів та актиноїдів в ВЯП енергетичного реактору ВВЕР-1000

Нуклід	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{244}\text{Cm}$	$^{241}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$
Вміст, г/т U	12300	5730	929000	126	5530	2420	31,7	616	120
Вміст, %	1,23	0,573	92,9	0,0126	0,553	0,242	0,00317	0,0616	0,012

Оскільки вміст оксиду урану значно більший, ніж інших ізоотопів, то концентрація палива буде визначатися тільки оксидом урану. Ядерна концентрація палива в  $1/\text{см}^3$  розраховується наступним чином:

$$N_{\text{нал}} = N_A \frac{\gamma_{\text{нал}}}{A_{\text{нал}}} = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot \frac{10,2}{270} = 2,275 \cdot 10^{22}, \quad (2.16)$$

де  $A_{\text{нал}}$  – атомна маса палива, 270;

$\gamma_{\text{UO}_2}$  – густина палива,  $10,2 \text{ г/см}^3$  [32].

Ядерні концентрації ізоотопів у  $1/\text{см}^3$ , що містяться в ВЯП визначаються за формулою:

$$N_{m_X} = C_{m_X} N_{\text{нал}}, \quad (2.17)$$

де  $C_{m_X}$  – масова частка ізоотопу у ВЯП [32].

Оскільки одна молекула палива містить два атоми кисню, то його ядерна концентрація становить:

$$N_O = 2N_{\text{нал}}. \quad (2.18)$$

Трубка ТВЕЛ виготовлена із рекристалізованого цирконію, легованого 1 мас. % ніобію. Тому для визначення ядерних концентрацій в оболонці ТВЕЛ у  $1/\text{см}^3$  застосуємо наступні формули:

$$N_{Zr} = C_{Zr} \frac{N_A \gamma_{ZrNb}}{A_{ZrNb}}, \quad (2.19)$$

$$N_{Nb} = C_{Nb} \frac{N_A \gamma_{ZrNb}}{A_{ZrNb}}, \quad (2.20)$$

де  $A_{ZrNb}$  – атомна маса матеріалу оболонки, 91;

$\gamma_{ZrNb}$  – густина оболонки,  $7,8 \text{ г/см}^3$  [33].

Ядерні концентрації в теплоносії у  $1/\text{см}^3$ :

$$N_{Na} = \frac{N_A \gamma_{Na}}{A_{Na}}, \quad (2.21)$$

де  $A_{Na}$  – атомна маса матеріалу оболонки, 11;

$\gamma_{Na}$  – густина оболонки, 0,9208 г/см<sup>3</sup> [32].

Ядерні концентрації в сповільнювачі у 1/см<sup>3</sup>:

$$N_{C_8H_8} = \frac{N_A \gamma_{C_2H_4}}{A_{C_2H_4}}, \quad (2.22)$$

$$N_C = 2N_{C_2H_4}, \quad (2.23)$$

$$N_H = 4N_{C_2H_4}, \quad (2.24)$$

де  $A_{C_2H_4}$  – атомна маса матеріалу сповільнювача, 4,667;

$\gamma_{C_2H_4}$  – густина сповільнювача, 1,8 г/см<sup>3</sup> [34].

Результати розрахунку ядерних концентрацій приведені в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Ядерні концентрації ізоотопів, що містяться в реакторній установці

Нуклід	Концентрація, 1/см <sup>3</sup>	Концентрація, (1/см <sup>3</sup> )/барн
<i>Паливо</i>		
<sup>235</sup> U	2,798·10 <sup>20</sup>	2,798·10 <sup>-4</sup>
<sup>236</sup> U	1,304·10 <sup>20</sup>	1,304·10 <sup>-4</sup>
<sup>238</sup> U	2,113·10 <sup>22</sup>	2,113·10 <sup>-2</sup>
<sup>238</sup> Pu	2,866·10 <sup>18</sup>	2,866·10 <sup>-6</sup>
<sup>239</sup> Pu	1,258·10 <sup>20</sup>	1,258·10 <sup>-4</sup>
<sup>240</sup> Pu	5,505·10 <sup>19</sup>	5,505·10 <sup>-5</sup>
<sup>244</sup> Cm	7,212·10 <sup>17</sup>	7,212·10 <sup>-7</sup>
<sup>241</sup> Am	1,401·10 <sup>19</sup>	1,401·10 <sup>-5</sup>
<i>Оболонка ТВЕЛ</i>		
<sup>91</sup> Zr	5,11·10 <sup>22</sup>	5,11·10 <sup>-2</sup>
<sup>93</sup> Nb	5,162·10 <sup>20</sup>	5,162·10 <sup>-4</sup>
<i>Теплоносії</i>		
<sup>11</sup> Na	5,041·10 <sup>22</sup>	5,041·10 <sup>-2</sup>
<i>Сповільнювач</i>		
<sup>12</sup> C	7,743·10 <sup>23</sup>	7,743·10 <sup>-1</sup>
<sup>1</sup> H	1,549·10 <sup>23</sup>	1,549·10 <sup>-1</sup>

В результаті розрахунку в коді WIMSD-5B отримуємо наступну залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору (рис. 2.6).

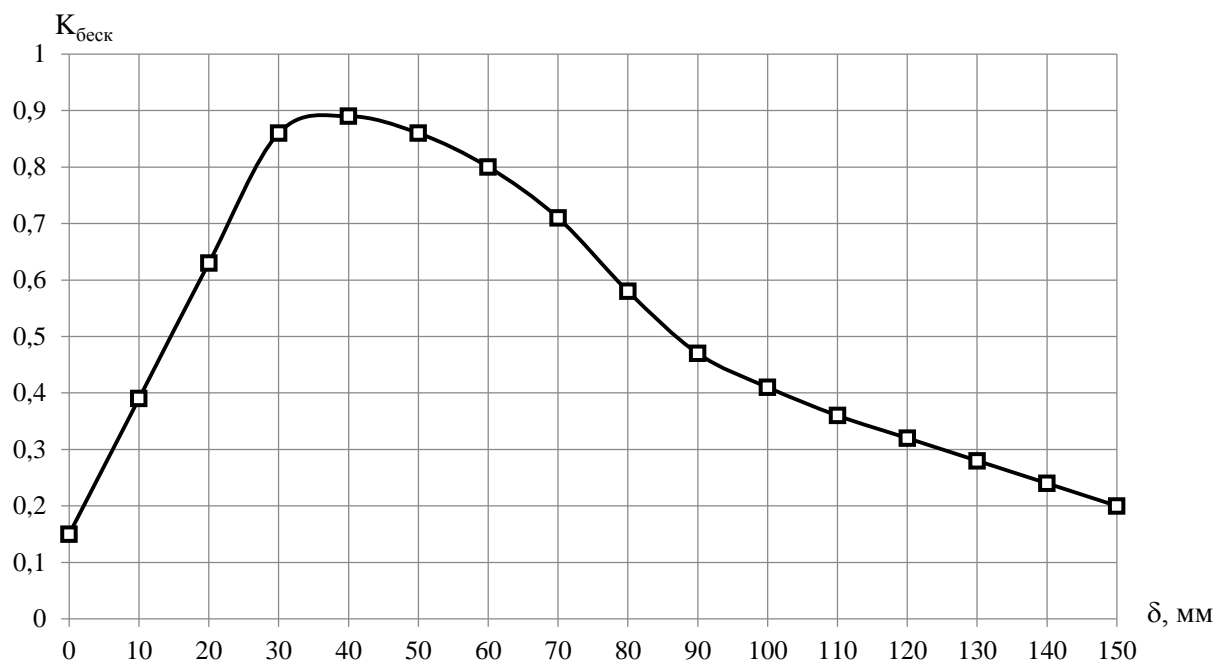


Рисунок 2.6 – Залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору

При повній відсутності сповільнювача, спектр нейтронів в реакторі є досить жорстким, тобто їх енергія мало відрізняється від тієї, яка є при народженні. Оскільки для ізотопів, що діляться, переріз ділення є малим в області таких енергій, то і кількість взаємодій з подальшим діленням ядра є такою, що приводить до мінімального ефективного коефіцієнта розмноження реактору.

При появі сповільнювача та поступовому збільшенні його товщини згенеровані нейтрони починають сповільнюватися до енергій, при яких збільшується ймовірність взаємодії нейтрона з важким ядром з подальшим його діленням, що приводить до зростання ефективного коефіцієнта розмноження. Однак після досягнення певної товщини сповільнювача (в даному випадку 5 см), ефективний коефіцієнт розмноження починає спадати, що свідчить про

погіршення розмножуючих властивостей реактора. Це відбувається через зростання ймовірності нейтрона бути поглинутим самим матеріалом сповільнювача. З подальшим збільшенням товщини ефективний коефіцієнт розмноження стабільно спадає.

Тому для найкращої ефективності проєктованого реактору вибираємо крок розташування технологічних каналів який відповідає товщині сповільнювача 38 мм, а саме 276 мм.

## 2.2 Модель підкритичного реактора із пластиковим сповільнювачем

В даному розділі виконується повірковий теплогідрравлічний розрахунок, задачею якого є визначення основних теплотехнічних параметрів при відомому конструктивному оформленні реактору та заданій потужності енерговиділення ВЯП. Без проведення даного розрахунку неможливі як попередні розробки схеми та конструкції реактора, так і вибір остаточного варіанту.

На сьогоднішній день одним з найпоширеніших способів проведення інженерних розрахунків обґрунтування теплотехнічної надійності тепловиділяючих збірок реакторів є використання тривимірних CFD (Computational Fluid Dynamics) кодів, що базуються на рішенні усереднених рівнянь Нав'є-Стокса у формі Рейнольдса (RANS). Для проведення даного розрахунку використовується програмний комплекс Fluent в середовищі Ansys WorkBanch [35].

Моделі, що розраховуються, підбиралися таким чином, щоб система була слабо підкритичною. Тобто, вона повинна мати ефективний коефіцієнт розмноження  $k_{\text{eff}} = 0,99$ . Зовнішнє джерело нейтронів розташоване всередині конструкції, забезпечуючи таким чином рівномірний розподіл нейтронів, що народжуватимуться [36].

Для проведення розрахунку у вказаному програмному комплексі необхідне задання теплогенерації на поверхні ТВЕЛ у вигляді питомого

теплогового потоку який можна визначити виходячи з об'ємного тепловиділення відпрацьованої ТВЗ:

$$q_v = q_{v0} \cdot k_b \cdot k_{en} = 111 \cdot 0,4 \cdot 1,2 = 36,63 \frac{MBt}{m^3}, \quad (2.25)$$

де  $q_{v0}$  – питоме об'ємне тепловиділення свіжої ТВЗ, для реактора типу ВВЕР-1000 становить  $111 \text{ MBt}/m^3$ ;

$k_b$  – коефіцієнт впливу вигорання на потужність енерговиділення ТВЗ (для ТВЗ, що вивантажуються з активної зони (АкЗ) реактору ВВЕР-1000 в середньому становить 0,4);

$k_{en}$  – коефіцієнт впливу збагачення на потужність енерговиділення ТВЗ (для ТВЗ, що вивантажуються з АкЗ реактору ВВЕР-1000 в середньому становить 1,2) [37].

Визначимо площу перерізу однієї ТВЗ [4]:

$$f_k = \frac{6}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{h_k}{2} \right)^2 = \frac{6}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{0,234}{2} \right)^2 = 0,038 \text{ м}^2. \quad (2.26)$$

Прохідний переріз касети обчислюється з врахуванням загородження твелями, трубками для стержнів регулювання та центральною трубкою,  $m^2$ :

$$S_k = f_k - \frac{\pi}{4} \left[ (d_{ц.м.}^{зоб.})^2 + n_{н.к.} (d_{н.к.})^2 + n_{тв} (d_{тв})^2 \right] = 0,038 - \frac{\pi}{4} \left[ (0,0112)^2 + 18 \times (0,0126)^2 + 312 \cdot (0,0091)^2 \right] = 0,01536 \text{ м}^2, \quad (2.27)$$

де  $d_{тв}$  – діаметр ТВЕЛ, мм;

$n_{тв}$  – число ТВЕЛів в ТВЗ, шт;

$d_{н.к.}$  – діаметр трубок для стержнів регулювання енерговиділення, мм;

$n_{н.к}$  – число трубок для стержнів регулювання енерговиділення, шт;

$d_{ц.т.}^{зоб.}$  – зовнішній діаметр центральної трубки, мм [4].

Об'єм однієї ТВЗ:

$$V = f_k \cdot H = 0,038 \cdot 3,55 = 0,133 \text{ м}^3, \quad (2.28)$$

де  $H$  – висота тепловиділяючої поверхні ТВЗ ВВЕР-1000, 3,55 м [4].

Загальне тепловиділення відпрацьованої ТВЗ [4]:

$$Q = q_v \cdot V = 36,63 \cdot 0,133 = 4,877 \text{ МВт}. \quad (2.29)$$

Площа тепловиділяючої поверхні ТВЗ [4]:

$$S = \pi d_{тв} n_{тв} H = \pi \cdot 0,0091 \cdot 312 \cdot 3,55 = 31,665 \text{ м}^2. \quad (2.30)$$

Середній питомий тепловий потік [4]:

$$\overline{q_s} = \frac{Q}{S} = \frac{4,877}{31,665} = 0,154 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}. \quad (2.31)$$

При симетричному енерговиділенні по висоті тепловий потік змінюється за законом, що близький до косинусоїдального:

$$q_s(z) = q_{s0} \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right), \quad (2.32)$$

де  $q_{s0}$  – тепловий потік в центральній площині активної зони, що отримується шляхом інтегрування даного виразу по висоті активної зони, Вт/м<sup>2</sup> [32].

В результаті інтегрування отримаємо:

$$q_{s0} = \overline{q_s} \cdot \frac{\pi}{2H} = 0,154 \cdot \frac{3,14}{2 \cdot 3,55} = 0,068107 \frac{MBm}{m^2} = 68107 \frac{Bm}{m^2}. \quad (2.33)$$

Отже, функція, що описує зміну теплового потоку по висоті активної зони в чисельному вигляді має вигляд:

$$q_s(z) = 68107 \cos\left(\frac{3,14 \cdot z}{3,55}\right), \quad (2.34)$$

та буде задана в якості якісної характеристики генерації тепла в реакторі для Ansys Fluent.

Витрата теплоносія в кг/с через реактор визначається співвідношенням:

$$G = \frac{Q_{менл}}{\Delta h}, \quad (2.35)$$

де  $\Delta h = h_{вх} - h_{вих}$  – повний перепад ентальпії теплоносія від входу в реактор  $h_{вх}$  до виходу з нього  $h_{вих}$ , кДж/кг [32].

Відповідна ентальпія визначається за вхідними та вихідними параметрами (тиск та температура) теплоносія. Оскільки в даному типі реактору не відбувається кипіння та підігрів теплоносія від входу до виходу не великий, то витрата теплоносія в кг/с визначається співвідношенням:



$$G = \frac{Q_{\text{тепл}}}{c_p \Delta \vartheta_m} \quad (2.36)$$

де теплоємність теплоносія  $c_p$  визначається як середнє арифметичне в інтервалі температури теплоносія на вході  $\vartheta_m^{\text{вх}}$  і виході  $\vartheta_m^{\text{вих}}$  [32].

Представлені залежності свідчать, що визначення витрати теплоносія пов'язано з вибором перепаду температур як одного з обмежуючих факторів. Гранично допустима температура на виході в даному випадку залежить від температури плавлення сповільнювача, що становить 170 °С. При цьому необхідно створити запас до температури плавлення, який приймемо 25 °С.

Гранично допустимою температурою на вході в реактор, є температура кристалізації натрієвого теплоносія, яка становить 98 °С. Зменшення температури нижче цієї приведе до затвердіння теплоносія, що зумовить необхідність використання систем гарячого пару для його розігріву. Тому приймаємо запас до температури кристалізації натрію в 15 °С. Отже,  $\vartheta_m^{\text{вх}} = 113^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_m^{\text{вих}} = 145^\circ\text{C}$ . Для даного інтервалу температур питома ізобарна теплоємність для натрію становить  $c_p = 1371,6 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

Тоді для забезпечення заданого підігріву в кожному з каналів реактору необхідно забезпечити витрату теплоносія:

$$G = \frac{Q}{c_p \Delta \vartheta_m} = \frac{4,877 \cdot 10^6}{1371,6 \cdot (145 - 113)} = 111,11 \text{ кг/с.} \quad (2.37)$$

Середня швидкість теплоносія в каналах активної зони визначається за формулою:

$$w = \frac{G}{\rho S_{\text{чар}}} = \frac{111,11}{920,8 \cdot 0,01536} = 7,8559 \text{ м/с,} \quad (2.38)$$

де  $S_{\text{чар}}$  – переріз для проходу теплоносія через чарунку активної зони,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – густина теплоносія, яка визначається по середнім параметрам (тиск та температура) теплоносія,  $\text{кг/м}^3$  [32].

На рис. 2.7 продемонстровано залежність теплогенерації по висоті активної зони. Генерація тепла залежить від кількості ділень ядер, що відбуваються в паливі, яка в свою чергу пропорційна потоку нейтронів в реакторі, який розподілений за даним законом в реакторах циліндричної форми.

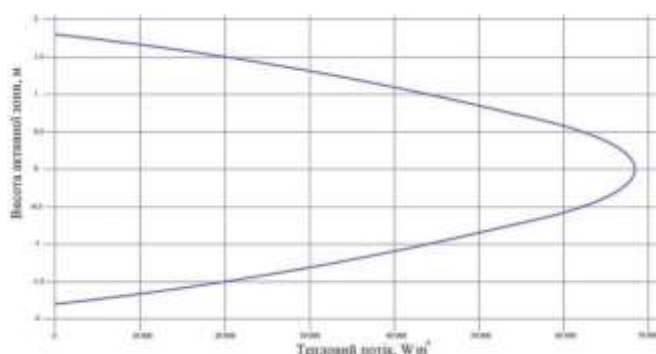


Рисунок 2.7 – Розподіл теплогенерації за висотою активної зони

Як видно з графіку найінтенсивніше тепловиділення відбувається в центрі активної зони, в той час як знизу та зверху воно прямує до 0. Результати розрахунку наведено на рис. 2.8.

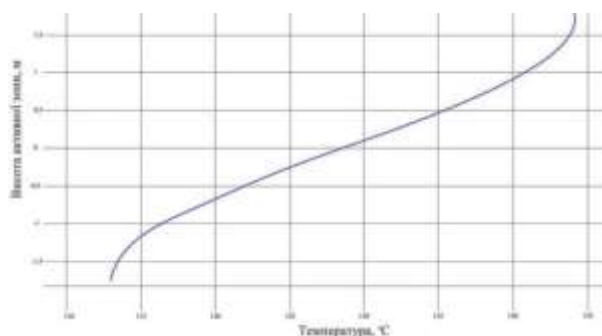


Рисунок 2.8 – Розподіл середньої температури за висотою ТВЗ

Даний графік показує зміну температури теплоносія по висоті ТВЗ. На вході в АкЗ підігрів теплоносія досить не значний, зважаючи на низький тепловий потік. При наближенні до центру АкЗ збільшується тепловий потік та

спостерігається прямолінійний підігрів теплоносія. На виході з АкЗ підігрів знову зменшується, зі зменшення теплового потоку.

На рис. 2.9 та рис. 2.10 наведено розподіл температури теплоносія на виході з ТВЗ та за об'ємом пластикового сповільнювача у реакторі.

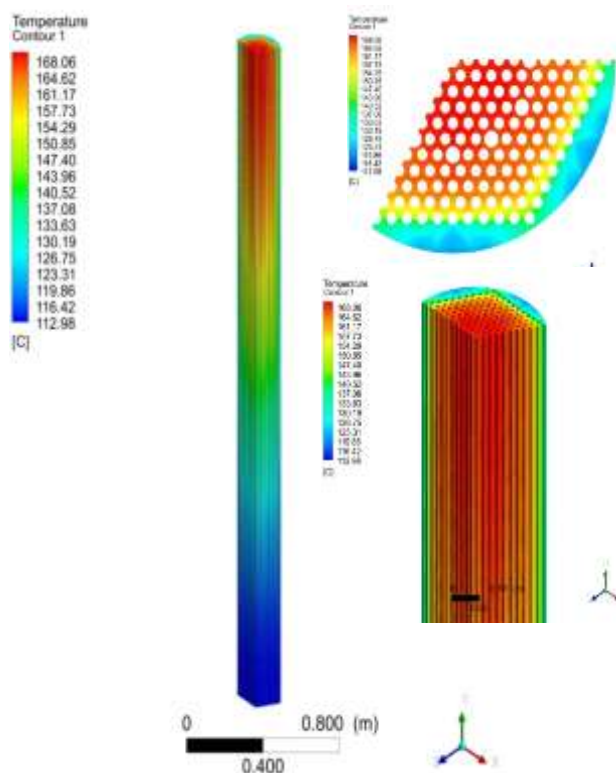


Рисунок 2.9 – Розподіл температури за об'ємом ТВЗ

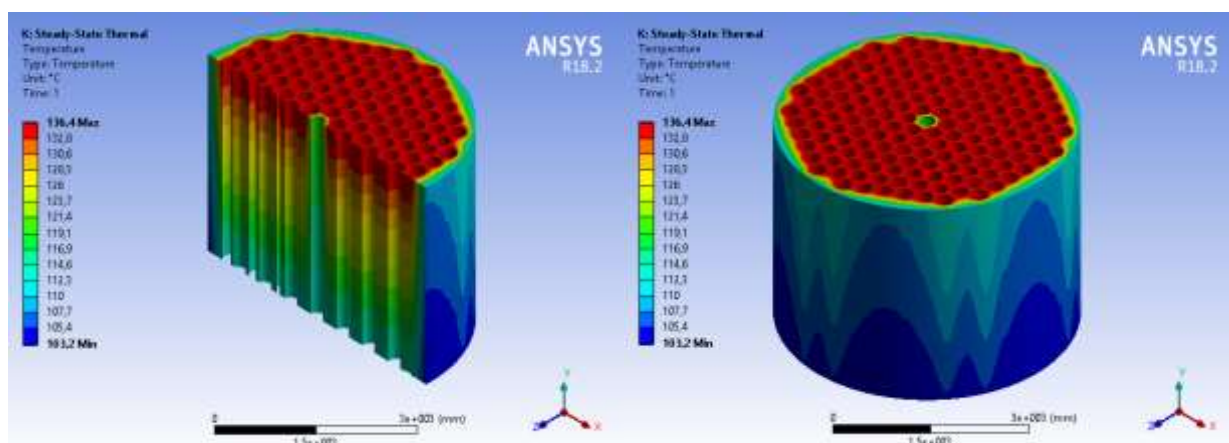


Рисунок 2.10 – Розподіл температури за об'ємом пластикового сповільнювача

Натрієвий теплоносіє подається в нижню частину реактору трубами– підводами з температурою 113 °С. Оскільки тепловиділення по висоті реактора змінюється за законом косинуса, в нижній та верхніх частинах ядерної установки воно становить нуль. Таким чином, температура сповільнювача внизу реактора відповідає температурі теплоносія на вході. Теплоносіє, проходячи через канали, нагрівається від зовнішніх оболонок ТВЕЛ, поступово збільшує свою температуру, в результаті чого відбувається нагрів сповільнювача по висоті. Температура центрального каналу реактора, де розміщене зовнішнє джерело нейтронів, по висоті залишається практично незмінною за рахунок відсутності в ньому теплогенеруючих джерел та незначного обміну теплоти із оточуючим пластиковими стінками. По периферії реактора температура значно падає до 103,2°С за рахунок втрат теплоти в зовнішнє середовище. З результатів розрахунку видно, що максимальна температура в об'ємі пластикового сповільнювача становить 136,4°С, що менше температури плавлення пластику. Це свідчить про технічну можливість використання поліетилену в даному типі реактора.

На рис. 2.11 наведено розподіл температурного потоку за об'ємом пластикового сповільнювача.

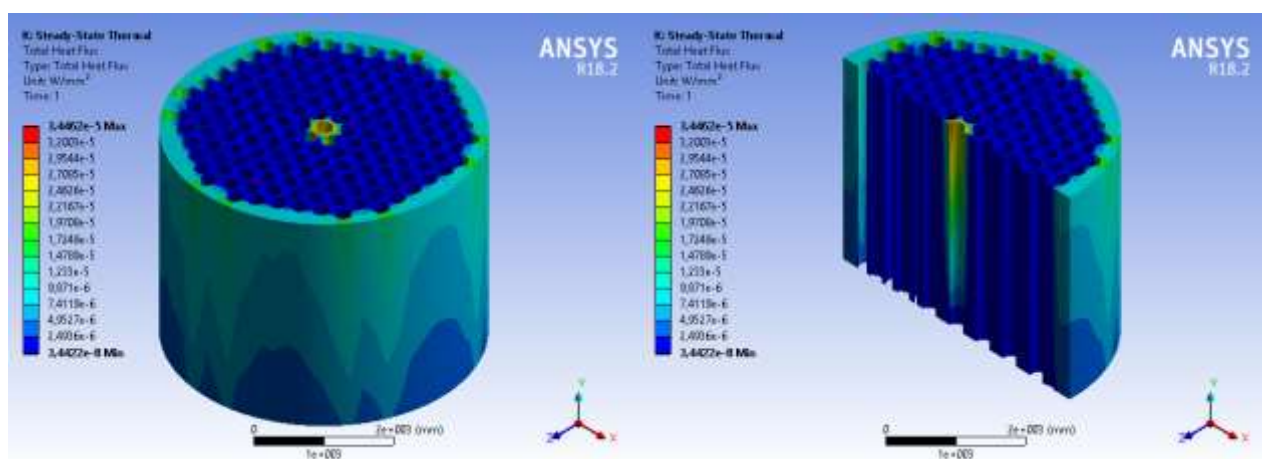


Рисунок 2.11 – Розподіл теплового потоку за об'ємом пластикового сповільнювача

Таким чином, значення теплового потоку в пластику між сусідніми каналами, в яких наявні джерела теплоти, досить низьке, що свідчить про однорідність температурного поля в реакторі. Відмінна ситуація спостерігається в центральному каналі, до якого тепловий потік надходить від сусідніх каналів за рахунок різниці температур. В периферії реактору також існує суттєвий тепловий потік, зумовлений витоком теплоти в навколишнє середовище.

При розігріванні реактору до робочої температури в пластику сповільнювача виникають температурні розширення наведені на рис. 2.12.

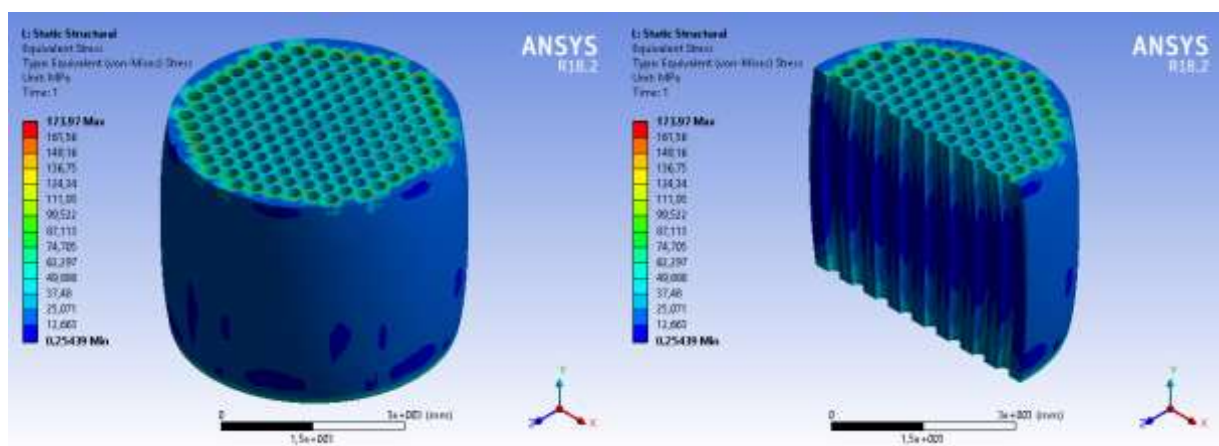


Рисунок 2.12 – Розподіл поля напружень за об'ємом пластикового сповільнювача

З рис. 2.12 видно, що напруження виникають в місці закріплення сповільнювача (на нижній платформі та ободах каналів реактору) за допомогою жорсткого з'єднання. Саме ці напруження і починають викликати деформацію сповільнювача, якісне та кількісне значення якої наведено на наступному рисунку. Максимальне напруження, яке виникає в об'ємі сповільнювача становить 173,97 МПа, при допустимому для поліетилена 350 МПа.

З рис. 2.13 видно, що місце, яке підлягає закріпленню жорстким з'єднанням (нижня платформа) залишається недеформованими, а верхня частина корпусу зміщується на незначну відстань ввєрх завдяки гнучкому закріпленню.

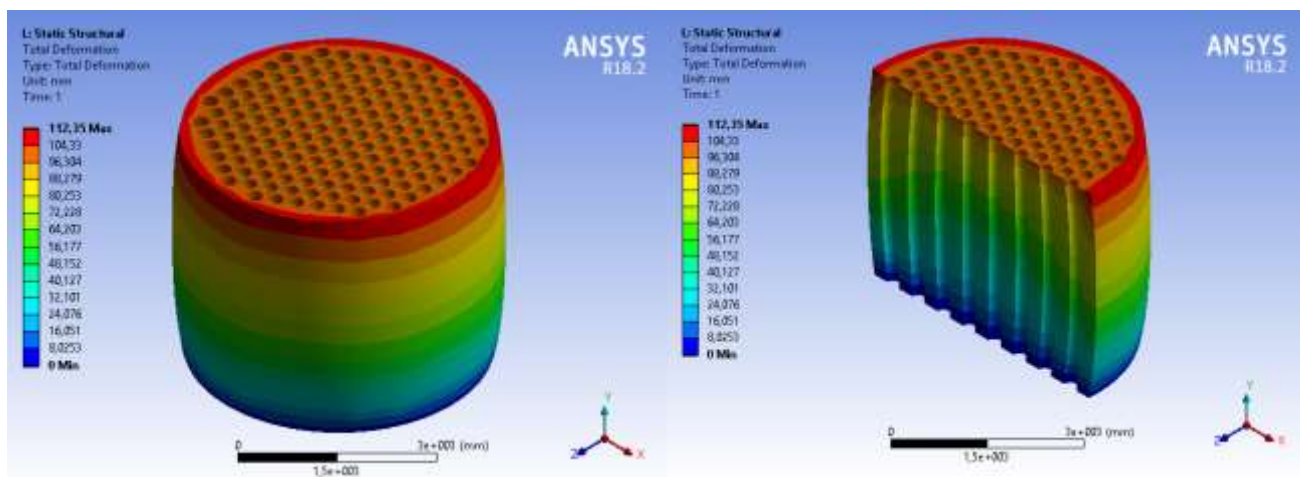


Рисунок 2.13 – Розподіл поля деформацій за об'ємом пластикового сповільнювача

Бокові грані сповільнювача втрачають початкову форму та деформуються назовні через нерівномірність теплового розширення поліетилену в залежності від температури. Максимальна деформація, яка виникає в об'ємі сповільнювача становить 112,35 мм, що знаходиться в межах допустимих відхилень.

Загалом, проведене дослідження підтверджує можливість застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів в підкритичних системах, що керуються зовнішнім джерелом нейтронів.

## Висновки до розділу 2

1. Визначено основні параметрами, що впливають на роботу підкритичної ядерної установки. Методом ієрархій за Т. Сааті проведено порівняння полімерних матеріалів, що можуть бути використані в якості сповільнювача, та доведено оптимальність застосування поліетилену низького тиску.

2. Проаналізовано типи теплоносіїв, що застосовуються у вітчизняних АЕС та, використавши інструмент Пошук розв'язку табличного процесора Excel в задачах лінійного програмування, обрано оптимальний теплоносій – рідкий натрій, що характеризується задовільними ядерно-фізичними та

теплогідравлічними показниками, а також забезпечує надійний тепловідвід та безпечну експлуатацію ядерної установки.

3. У програмному комплексі WIMS проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора з пластиковим сповільнювачем, визначено ядерні концентрації ізотопів, що містяться у ВЯП, встановлено залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору.

4. Виконано повірковий теплогідравлічний розрахунок, визначено основні теплотехнічні параметри при відомому конструктивному оформленні реактору та заданій потужності енерговиділення ВЯП, досліджено розподіл теплогенерації та температури за висотою активної зони.

5. Визначено основні показники безпеки функціонування підкритичного реактору з пластиковим сповільнювачем, а саме: розподіл температури, теплового поля, полів напружень, що виникають при нагріванні пластикових елементів у реакторі. Встановлені основні локації можливих деформацій, результати моделювання свідчать про можливість застосування синтетичних полімерів в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

### **3 ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ СПОВІЛЬНЕННЯ ШВИДКИХ НЕЙТРОНІВ ІЗ ВТОРСИРОВИНИ**

Цінність пластикових відходів, що зумовлена можливістю їх повторного використання в якості сировини, наштовхнули на проведення дослідження по виявленню можливості застосування пластику, що піддавався переробці в якості сповільнювача швидких нейтронів в підкритичній ядерній установці. Для виконання поставленого завдання необхідно проаналізувати методи переробки пластикових відходів та продукцію, що утворюється на виході.

Здійснювати вторинну переробку пластику доцільно, якщо структура полімеру не була пошкоджена при виготовленні та зазнала незначних змін при використанні. Ознаками розкладання пластику можуть бути зменшення молекулярної маси, морфологічні та структурні зміни, що спричиняють погіршення фізичних властивостей, в тому числі – зниження температури плавлення.

#### **3.1 Аналіз вторинної сировини для використання в системі сповільнення**

При переробці полімерів важливо уникати подальшої деструкції в технологічному процесі переробки. Дане завдання вирішується використанням якісного обладнання, введенням стабілізаторів, виконанням усіх умов переробки та ін. На сьогодні доступні наступні методи переробки пластику: гідроліз, гліколіз, метаноліз, піроліз та механічний рециклінг.

Гідроліз заснований на розщепленні пластику водними розчинами кислот під дією високих температур. Переробка пластику виконується за наступним алгоритмом: відходи промивають та подрібнюють, здійснюють окрихчування отриманих пластівців та поступове їх подрібнення. Наступним етапом є гідролізація отриманої маси в скляному реакторі при температурі до 200°C в розрідженому середовищі [38]. Після даної процедури проводять нейтралізацію



отриманих розчинів та відфільтровують тверді фракції. Утворена олігомерна суміш підлягає полімеризації, після якої утворюються очищені гранули полімеру, що не поступаються характеристиками первинному матеріалу.

Гліколіз відрізняється від гідролізу матеріалом деполімеризації: замість води в даному способі застосовують гліколі. Обов'язковою до виконання умовою реакції є екстремально високі температури (240 °C – 250 °C) [39]. Гліколіз дозволяє переробляти відходи без їх попереднього ретельного сортування та очищення, однак, пластики, що виготовляються на основі такої сировини не підходять для використання в харчовій промисловості.

В основі метанолізу лежить процес розпаду пластмас за допомогою метанолу. Процес реалізується в реакторах, де забезпечується температура понад 150°C і стабільний тиск 1,5 МПа [40]. В якості каталізаторів при метанолізу використовуються переетерифікатори. Одержаний продукт досить специфічний та може бути використаний лише для виготовлення поліефірів. [41].

Складність метанолізу викликана підвищеними вимогами до попередньої очистки сировини і високою вартістю процесу деполімеризації. Додатковою перешкодою є необхідність наявності метанолу, який є продуктом згорання деревини та природного газу [42].

Піроліз призводить до термічного розкладу вихідної сировини, особливістю перебігу даної реакції є відсутність доступу кисню на всіх етапах горіння. При цьому не вимагається попереднє ретельне сортування та очищення. Сировина безконтактно завантажується в реактор, після чого нагрівається всередині камери зі швидкістю збільшення температури від 2 °C до 3 °C в хвилину, при цьому температура може становити 500°C [42].

Механічний рециклінг пластику відбувається у три етапи: дроблення, агломерація та грануляція. Сировина для початку проходить сортування, після чого відібраний матеріал надходить в дробарку. Утворена пластикова крихта на наступному етапі очищається розчином каустичної соди та направляється в сушарку. Сушка відбувається при температурі + 130 °C, оскільки наявність

залишків вологи у сировині негативно позначається на якості вторинної пластмаси, тому процес супроводжується постійним перемішуванням [41].

Висушена пластикова крихта потрапляє в екструдер, на наступну стадію переробки – агломерацію. В пристрої відбувається пом'якшення пластмаси з наступним продавлюванням пластичної маси через формуючий пристрій. Необхідно враховувати властивості речовин, що подаються на переробку: якщо елемент виготовлений з двох матеріалів, наприклад полівінілхлорид (ПВХ) та ПЕТФ, при агломерації ПВХ розчинить ПЕТФ.

Після агломерації отриманий матеріал можливо запускати в реалізацію, однак проходження через останню стадію грануляції дозволяє покращувати якість пластмаси за рахунок змішування з добавками та барвниками. На виході утворюються пластикові гранули готові до подальшого використання у масовому виробництві.

Проаналізувавши методи переробки пластикових відходів, а також характеристики утворених продуктів в результаті утилізації, можна зробити висновок, що для моделювання підкритичного реактору із пластиковим сповільнювачем, який буде виготовлений із вторинної сировини, доцільно використовувати продукцію, отриману методом механічного рециклінгу як таку, що зазнала найменшого впливу деструкції в ході технологічного процесу переробки, зберігши при цьому властивості первинної сировини.

Оскільки найбільш реалізованим на ринку вторинної сировини є ПЕТФ, розглянемо його в якості потенційної сировини для виготовлення системи сповільнення швидких нейтронів. Вторинний ПЕТФ за своїми якісними характеристиками дещо відрізняється від первинного. Він є менш щільним, володіє нижчими показниками термостійкості, має менший поріг стійкості до розтягу та вигину. Однак додаткова стадія агломерації сприяє ущільненню матеріалу та усередненню характеристик вторинної сировини.

При вторинній переробці молекули матеріалу пошкоджуються при механічному навантаженні в екструдері. На якість матеріалу також впливає температурний режим, при якому збільшується активність руху молекул та

зв'язки між атомами стають менш міцними, як при звичайних температурах. Після вторинної переробки в полімерних молекулах зв'язки частково розриваються, утворюючи при цьому вільні радикали, які можуть утворювати сполуки із сусідніми пошкодженими молекулами. Таким чином в матеріалі виникають так звані «спайки», значний вміст яких погіршує механічні властивості ПЕТФ. В табл. 3.1. наводиться порівняння зразків полімеру, отриманого з перероблених пляшок та вихідного полімеру [43].

Таблиця 3.1 – Властивості ПЕТФ до та після механічного рециклінгу

Властивість	Первинний ПЕТФ	Повторно перероблений ПЕТФ
Міцність на розтяг, МПа	200	179
Відносне видовження при розриві, %	69,7	36,9
Ударна міцність, Н	135	120
Полідисперсність	7,47	7,94
Об'ємна маса, кг/м <sup>3</sup>	0,0015	0,002
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м К	0,14	0,148

Таким чином, показники, що визначають безпеку роботи підкритичного реактору, зазнали несуттєвих змін. Однак проведені дослідження [17] показують, що при наступних процесах переробки пластику властивості матеріалу поступово погіршуються (рис. 3.1).

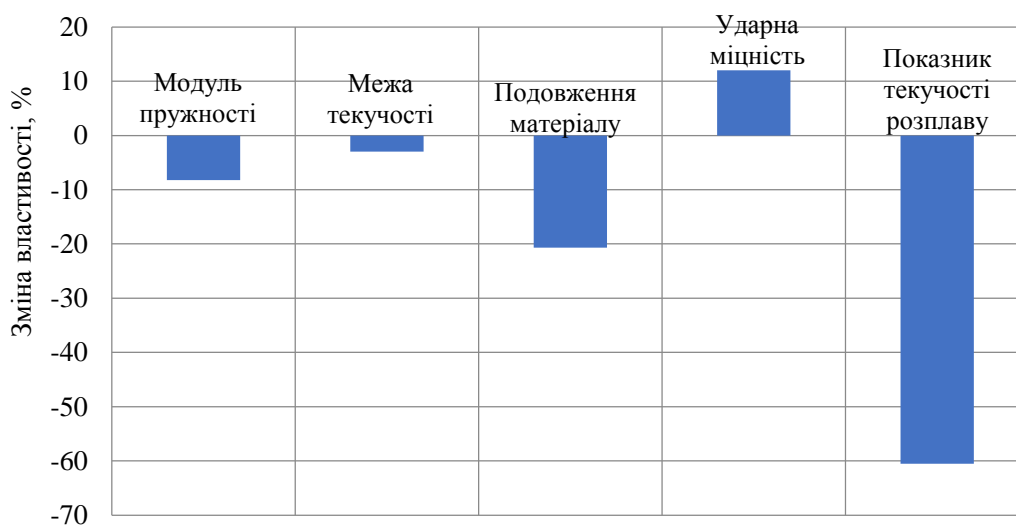


Рисунок 3.1 – Зміни властивостей ПЕТФ після 15 циклів рециклінгу

В ЄС використання вторинного ПЕТФ обмежене законодавством, яке забороняє контакт цього матеріалу з харчовим продуктом. Тому виробники вдаються до технології «bottle-in-bottle», яка передбачає, що вміст ємності буде контактувати з шаром матеріалу, виготовленого з первинного ПЕТФ. Даний метод дозволяє забезпечувати використання вторинного матеріалу на 80% [44].

Однак пошкодження міжмолекулярних зв'язків при механічному рециклінгу знижує поріг плавлення матеріалу на 8 % від первинного показника, міцність на розтяг при цьому збільшується. Враховуючи це, для моделювання підкритичного реактору необхідно здійснити перерахунок товщини сповільнювача в системі та визначити чи затрати на використання вторинної сировини не перевищуватимуть капіталовкладення при застосуванні первинного пластику.

### 3.2 Модель підкритичного реактору із сповільнювачем з вторинного ПЕТФ

Розрахунок геометричних розмірів підкритичної ядерної установки із сповільнювачем з вторинного ПЕТФ проводиться аналогічно до розрахунку, що проводився в пункті 2.1.3. Вихідні дані, що необхідні для задання в програмному комплексі WIMS, а саме геометричні характеристики (табл. 2.12) та ядерні концентрації ізоотопів в паливі, оболонці ТВЕЛ, теплоносії (табл. 2.13) залишаються незмінними. Ядерні концентрації ізоотопів в сповільнювачі зазнають змін, внаслідок зміни матеріалу сповільнювача. Розрахунок даних концентрацій проводиться за формулами:

$$N_{C_{10}H_8O_4} = \frac{N_A \gamma_{C_{10}H_8O_4}}{A_{C_{10}H_8O_4}}, \quad (3.1)$$

$$N_C = 10N_{C_{10}H_8O_4}, \quad (3.2)$$

$$N_H = 8N_{C_{10}H_8O_4}, \quad (3.3)$$

$$N_O = 4N_{C_{10}H_8O_4}, \quad (3.4)$$

де  $A_{C_{10}H_8O_4}$  – атомна маса матеріалу оболонки, 8,72;

$\gamma_{C_{10}H_8O_4}$  – густина оболонки, 1,38 г/см<sup>3</sup> [32].

Результати розрахунку ядерних концентрацій в сповільнювачі приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Ядерні концентрації ізотопів, що містяться в сповільнювачі

Нуклід	Концентрація, 1/см <sup>3</sup>	Концентрація, (1/см <sup>3</sup> )/барн
<i>Сповільнювач</i>		
<sup>12</sup> C	$9,522 \cdot 10^{23}$	$9,522 \cdot 10^{-1}$
<sup>1</sup> H	$7,618 \cdot 10^{23}$	$7,618 \cdot 10^{-1}$
<sup>16</sup> O	$3,809 \cdot 10^{23}$	$3,809 \cdot 10^{-1}$

Приклад вихідного файлу для розрахунку в кодї WIMSD-5B для випадку кроку технологічних каналів  $h=288$  мм наведено в Додатку А. В результаті розрахунку в кодї WIMSD-5B отримуємо залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача із вторинного ПЕТФ між технологічними каналами реактору (рис. 3.2).

З рис. 3.2 видно, що зміна матеріалу сповільнювача впливає на ефективність сповільнення нейтронів, що, в свою чергу, призводить до зміщення максимуму ефективного коефіцієнту розмноження: якщо для еталонного поліетиленового сповільнювача даний показник досягався при товщині 38 мм, то екстремум функції для ПЕТФу отримується при значенні 50 мм. Тому для більшої ефективності проєктованого реактору вибираємо крок розташування технологічних каналів, який відповідає товщині сповільнювача 50 мм (табл. 3.2), а саме 276 мм. Для проведення повіркового теплогідравлічного розрахунку реактора з вторинним сповільнювачем з ПЕТФ також використовується програмний комплекс Fluent в середовищі Ansys WorkBanch.

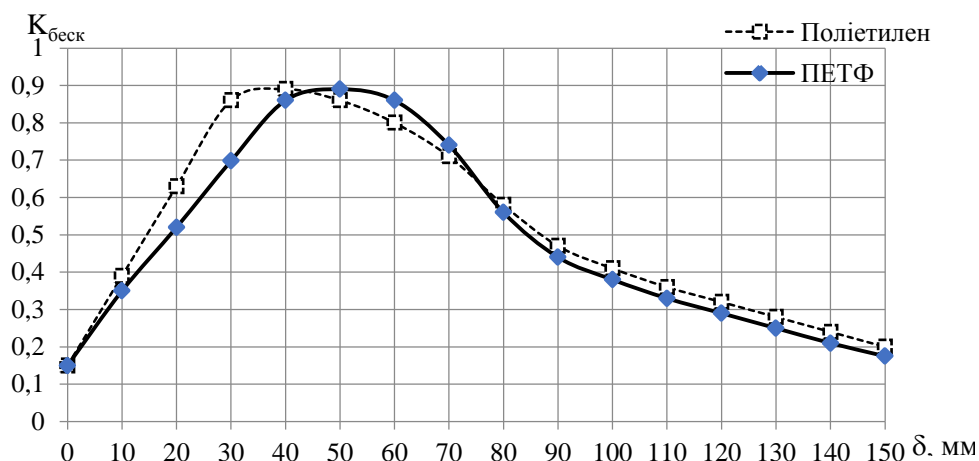


Рисунок 3.2 – Залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору

Витрата теплоносія через реактор визначається співвідношенням 2.35. Гранично допустима температура на виході в даному випадку залежить від температури плавлення сповільнювача, що становить 255 °С. При цьому необхідно створити запас до температури плавлення, який приймемо 25 °С. Гранично допустимою температурою на вході в реактор, є температура кристалізації натрієвого теплоносія, яка становить 98 °С. Тому приймаємо запас до температури кристалізації натрію в 15 °С. Отже,  $\vartheta_m^{\text{ex}} = 113^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_m^{\text{вх}} = 230^\circ\text{C}$ . Для даного інтервалу температур питома ізобарна теплоємність для натрію становить  $c_p = 1352,1 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ . Тоді для забезпечення заданого підігріву в кожному з каналів реактору необхідно забезпечити витрату теплоносія, що розраховується за формулою (2.35), та становить 111,11 кг/с.

Середня швидкість теплоносія в каналах активної зони визначається за формулою 2.38 та становить 2,20 м/с.

За результатами моделювання на рис. 3.3 – 3.7 наведено розподіл температури теплоносія на виході з ТВЗ, температуру, тепловий потік, напруження та деформації за об'ємом сповільнювача із вторинного ПЕТФ реакторі.

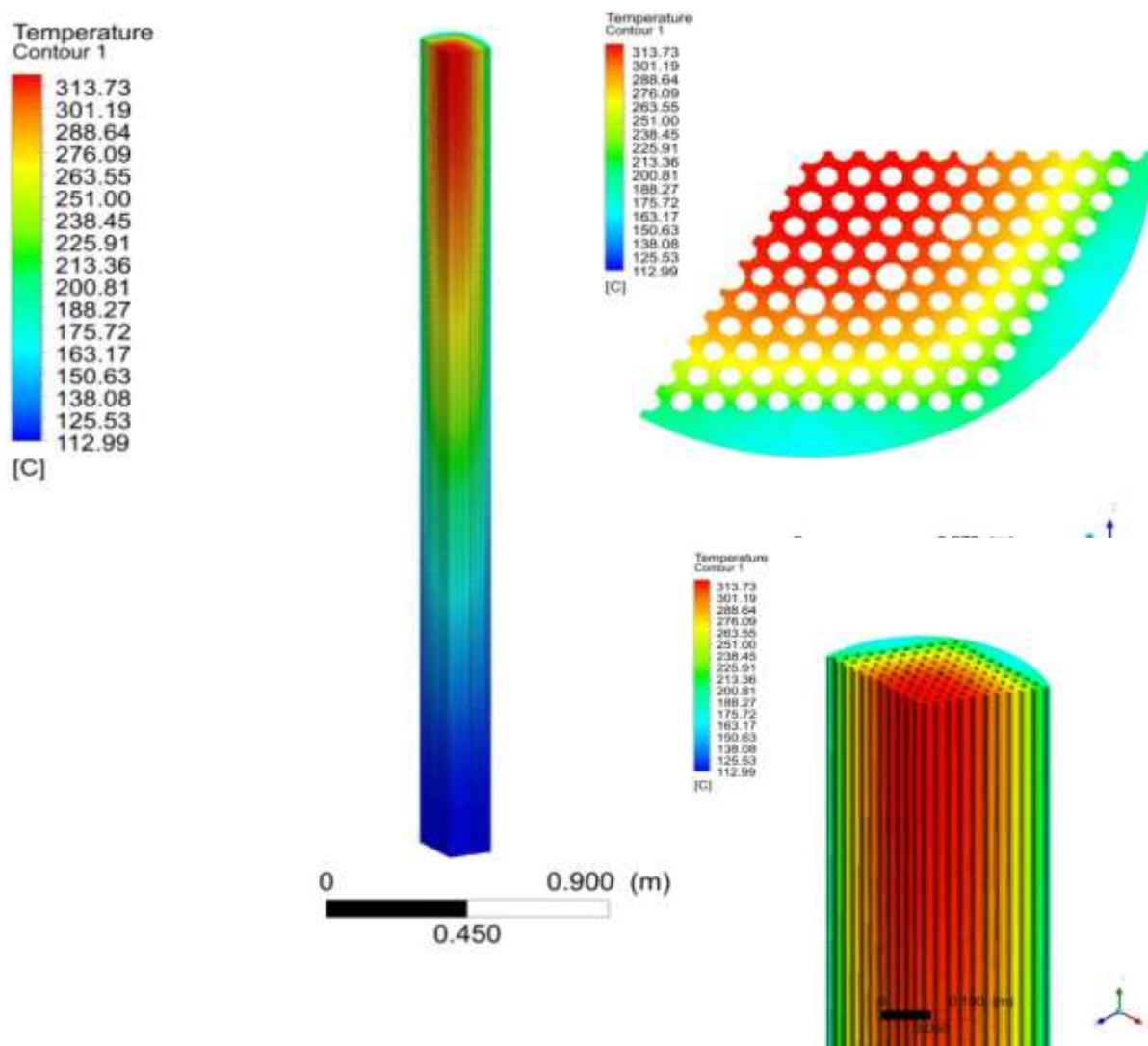


Рисунок 3.3 – Розподіл температури за об'ємом ТВЗ

Натрієвий теплоносій, як і в випадку з розрахунком в пункті 2.2 подається в нижню частину реактору трубами-підводами з температурою 113 °С. Теплоносій, проходячи через канали, нагрівається від зовнішніх оболонок ТВЕЛ, поступово збільшує свою температуру, в результаті чого відбувається нагрів сповільнювача по висоті. При тому ж розподілі та значенні теплового потоку, що приведений в пункті 2.2, максимальна середня температура збільшилася до 230° за рахунок зменшення швидкості теплоносія.

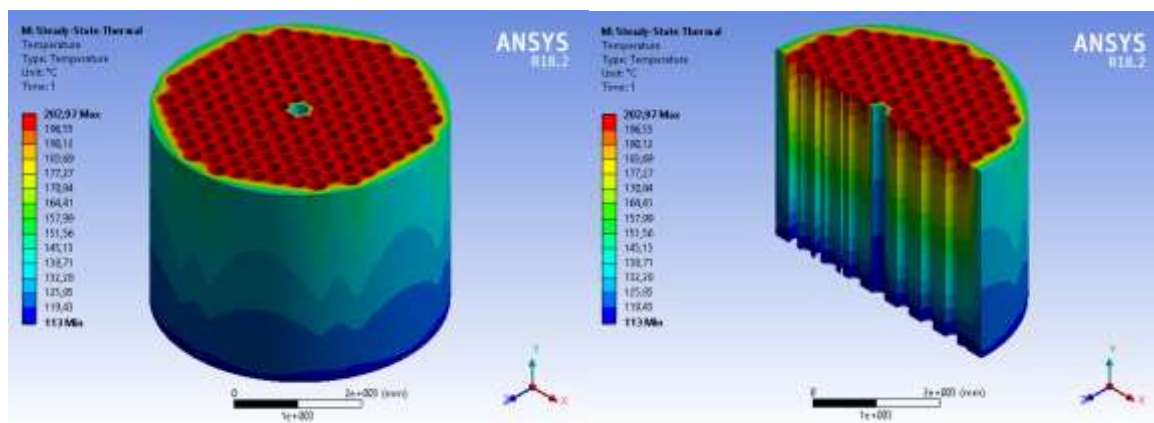


Рисунок 3.4 – Розподіл температури за об’ємом пластикового сповільнювача

Таке підвищення температури стало можливим завдяки використанню матеріалу сповільнювача з підвищеною температурою плавлення. З результатів розрахунку видно, що максимальна температура в об’ємі пластикового сповільнювача становить  $202,97^{\circ}\text{C}$ , що менше температури плавлення пластику, яка рівна  $255^{\circ}\text{C}$ . Це свідчить про технічну можливість використання вторинного ПЕТФ в даному типі реактору. Максимальне значення теплового потоку по об’єму сповільнювача зазнало збільшення в порівнянні з попереднім розрахунком, внаслідок збільшення різниці температур між каналами з ТВЗ, центральним каналом та зовнішньою поверхнею сповільнювача.

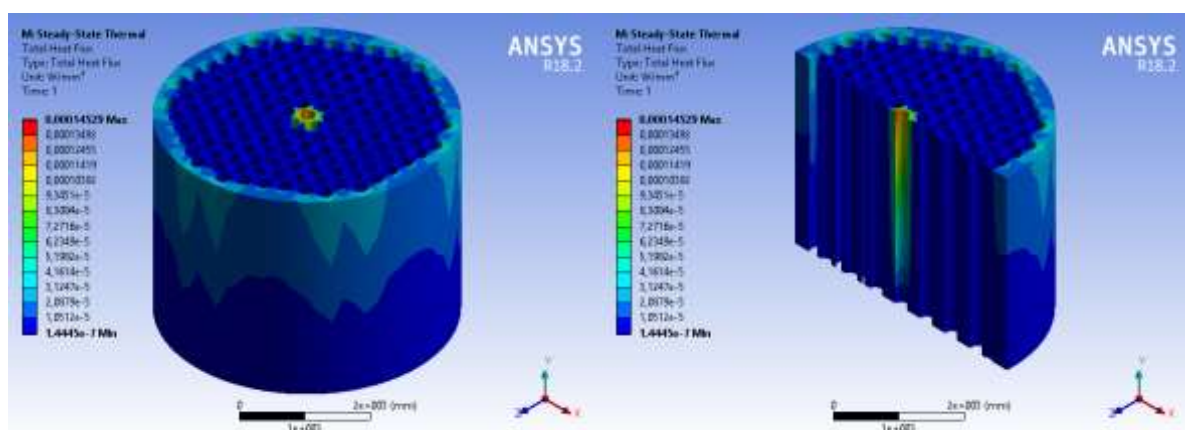


Рисунок 3.5 – Розподіл теплового потоку за об’ємом пластикового сповільнювача



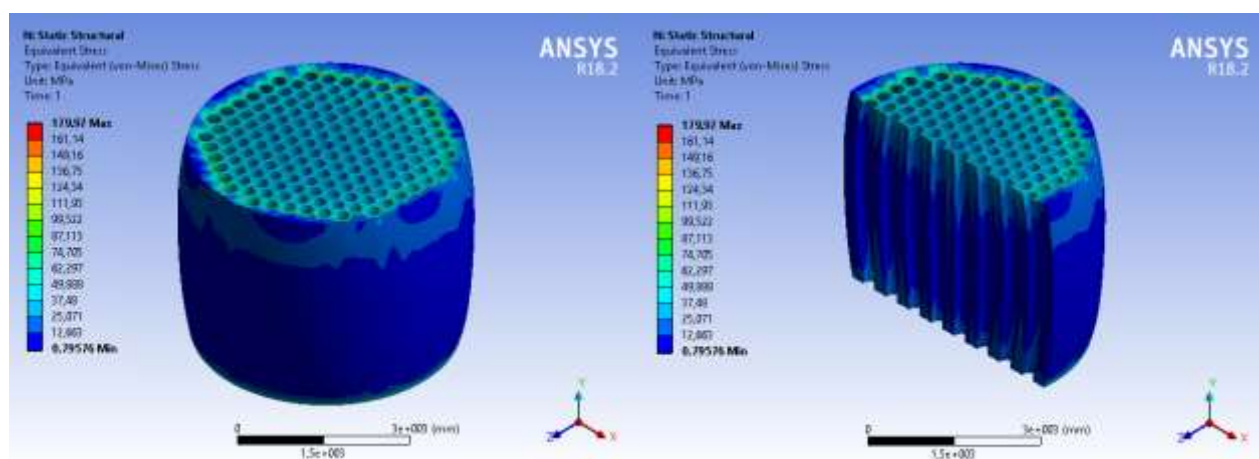


Рисунок 3.6 – Розподіл поля напружень за об'ємом пластикового сповільнювача

Максимальне напруження, яке виникає в об'ємі сповільнювача становить 179,97 МПа, при допустимому 200 МПа. Оскільки максимальне напруження має точковий характер поширення з невеликими площами, то навіть попри малу різницю між даними значеннями, можна стверджувати про надійність роботи реакторної установки.

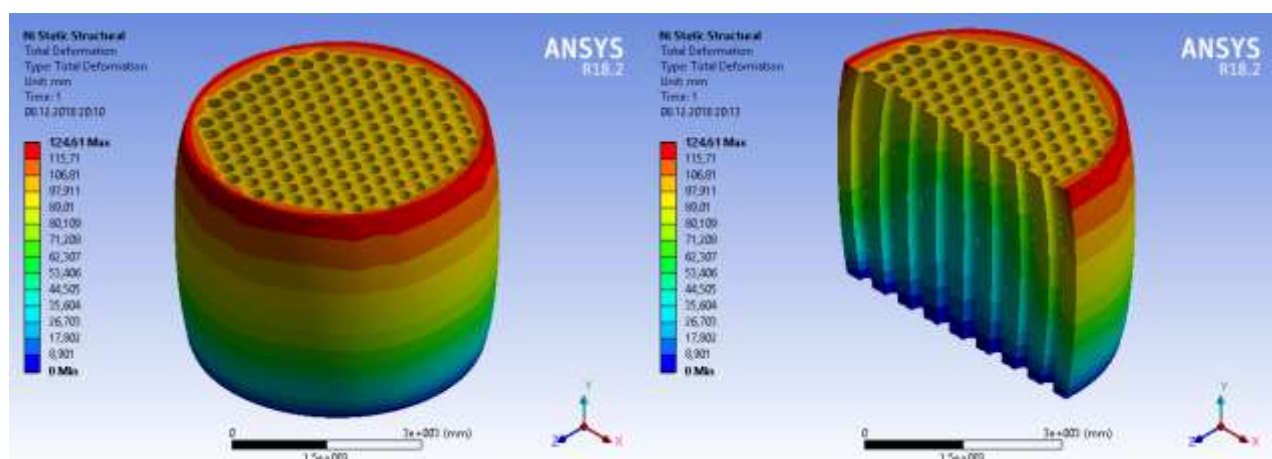


Рисунок 3.7 – Розподіл поля деформацій за об'ємом пластикового сповільнювача

Максимальна деформація, яка виникає в об'ємі сповільнювача збільшується в порівнянні з розрахунком приведеним в пункті 2.2 та становить 124,61 мм, однак знаходиться в межах допустимих відхилень. Тому проведене

дослідження підтверджує технічну можливість застосування вторинної сировини (ПЕТФ) в якості сповільнювача швидких нейтронів в підкритичних системах, що керуються зовнішнім джерелом нейтронів.

### 3.3 Еколого-економічне обґрунтування застосування вторинної сировини в підкритичному реакторі

Для реалізації проекту підкритичного реактору з пластиковим сповільнювачем, що піддався переробці, необхідно обґрунтувати економічну доцільність використання вторинної сировини замість первинного полімеру. В еталонному підкритичному реакторі було застосовано поліетилен низького тиску, середня вартість якого на ринку України становить 50 грн/кг від українського виробника [45]. Об'єм, який необхідно покрити матеріалом, враховуючи необхідну розраховану товщину, становить:

$$V_{ПЕ} = \pi R_{ПЕ}^2 H_r - 163\pi R_{\kappa}^2 H_{\kappa} = 21,58 м^3, \quad (3.5)$$

де  $R_{ПЕ}$  – радіус реакторної установки з поліетиленовим сповільнювачем, 2,35 м;

$H_r$  – висота реакторної установки, 3,55 м;

$R_{\kappa}$  – радіус технологічного каналу, 0,1351 м;

$H_{\kappa}$  – висота технологічного каналу, 3,55 м;

Перероблений методом механічного рециклінгу ПЕТФ у вигляді пластівців коштує 19 грн/кг [46]. Оскільки товщина стінки сповільнювача із даного матеріалу становить 50 мм, загальний об'єм системи сповільнення складе:

$$V_{ПЕТФ} = \pi R_{ПЕТФ}^2 H_r - 163\pi R_{\kappa}^2 H_{\kappa} = 28,395 м^3, \quad (3.6)$$

де  $R_{\text{ПЕТФ}}$  – радіус реакторної установки із сповільнювачем з вторинної сировини, 2,63 м;

Враховуючи, що густина поліетилену становить  $1800 \text{ кг/м}^3$ , а ПЕТФу –  $1380 \text{ кг/м}^3$ , вартість еталонного сповільнювача із поліетилену складе 1 942 200 грн, при цьому вартість сповільнювача із ПЕТФу – 744 517 грн (рис 3.8).



Рисунок 3.8 – Порівняльна характеристика сповільнювачів

Таким чином, використання вторинної сировини, зокрема ПЕТФ, є економічно ефективним в порівнянні з еталонним пластиком, навіть з врахуванням необхідності використання більшої кількості полімеру.

Варто зазначити, що екологічна ефективність функціонування даної системи зумовлена не лише використанням вторинної сировини замість традиційних сповільнювачів, а і радіоактивною безпечністю експлуатації такої установки. В процесі спалюванні радіоактивного палива в енергетичному реакторі безперервно утворюється високоактивний аргон-41 з періодом напіврозпаду 1,85 години. При незначних порушеннях цілісності захисної оболонки реактора за 36-годинний робочий тиждень  $\beta$ -часинки  $^{41}\text{Ar}$  створюють тканинну дозу в підшкірній клітковині величиною 10,8 мЗв/тиждень. Допустимі концентрації  $^{41}\text{Ar}$  в повітрі робочих приміщень визначаються рекомендаціями Міжнародної комісії з радіаційного захисту [47]–[48].

Для того, аби досягнути необхідного рівня безпеки функціонування підкритичного ядерного реактора з пластиковим сповільнювачем необхідно визначити товщину шару поглинача нейтронів, в даному випадку вторинного ПЕТФ. При цьому необхідно врахувати обмеженість геометричних розмірів реактору та зміну властивостей пластику після повторних циклів переробки.

Активність ядер  $^{41}\text{Ar}$  при радіоактивному розпаді в Бк визначається:

$$A = N \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (3.7)$$

де  $N$  – кількість радіоактивних ядер  $^{41}\text{Ar}$ ,  $1/\text{см}^3$ ;

$T_{1/2}$  – період напіврозпаду, с [49].

Швидкість зростання активності в Бк/( $\text{см}^3 \cdot \text{с}$ ) становить:

$$A' = R \cdot \frac{\ln 2}{T}, \quad (3.8)$$

де  $R$  – швидкість напрацювання ядер  $^{41}\text{Ar}$ , що визначається за формулою:

$$R = \sigma_{n-g} \cdot N_{^{40}\text{Ar}} \cdot \Phi, \quad (3.9)$$

де  $\sigma_{n-g}$  – мікроскопічний переріз взаємодії ядер  $^{40}\text{Ar}$  по каналу n-g, барн;

$N_{^{40}\text{Ar}}$  – концентрація ядер  $^{40}\text{Ar}$  в атмосферному повітрі,  $1/\text{см}^3$ ;

$\Phi$  – густина потоку нейтронів на зовнішній поверхні корпусу реактора,  $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  [49]–[50].

Мікроскопічний переріз взаємодії ядер  $^{40}\text{Ar}$  становить  $10^{-27} \text{ см}^2$ . Для визначення концентрації ядер  $^{40}\text{Ar}$  в атмосферному повітрі в необхідно визначити загальні ядерні концентрації в повітрі,  $1/\text{см}^3$ :

$$N_{пов} = \frac{N_A \cdot \gamma_{пов}}{M_{пов}}, \quad (3.10)$$

де  $\gamma_{пов}$  – густина повітря, 0,001225 г/см<sup>3</sup>;

$M_{пов}$  – молярна маса повітря, 29 г/моль [50].

З врахуванням масового вмісту <sup>40</sup>Ar в повітрі, що становить 0,9 %, концентрація його ядер становитиме, 1/см<sup>3</sup>:

$$N_{^{40}Ar} = 0,009 \cdot N_{пов}. \quad (3.11)$$

Густина потоку нейтронів при якому активність <sup>41</sup>Ar в атмосферному повітрі відповідно до [47] не буде перевищувати  $A' = 7$  Бк/см<sup>2</sup> визначається за формулою:

$$\Phi = \frac{A'}{\sigma \cdot N \cdot \ln 2}, \quad (3.12)$$

та становить  $4,422 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

Визначення густини потоку нейтронів на зовнішній поверхні реактору дає можливість провести розрахунковий код WIMSD-5B, за попередньо сформованим в пункті 3.2 вихідним файлом. В даному випадку проводиться розрахунок в залежності від товщини зовнішнього шару сповільнювача, мінімальне значення приймається рівним 0, тобто відсутність захисного шару.

Після проведення розрахунку отримано залежність густини потоку нейтронів на зовнішній поверхні реактору та забруднення повітря радіоактивним <sup>41</sup>Ar, що характеризується швидкістю зростання об'ємної активності повітря від товщини зовнішнього шару сповільнювача.

Графічна залежність забруднення повітря радіоактивним  $^{41}\text{Ar}$  від товщини зовнішнього шару сповільнювача після кожного циклу переробки  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  та  $m_5$  наведено на рис. 3.9.

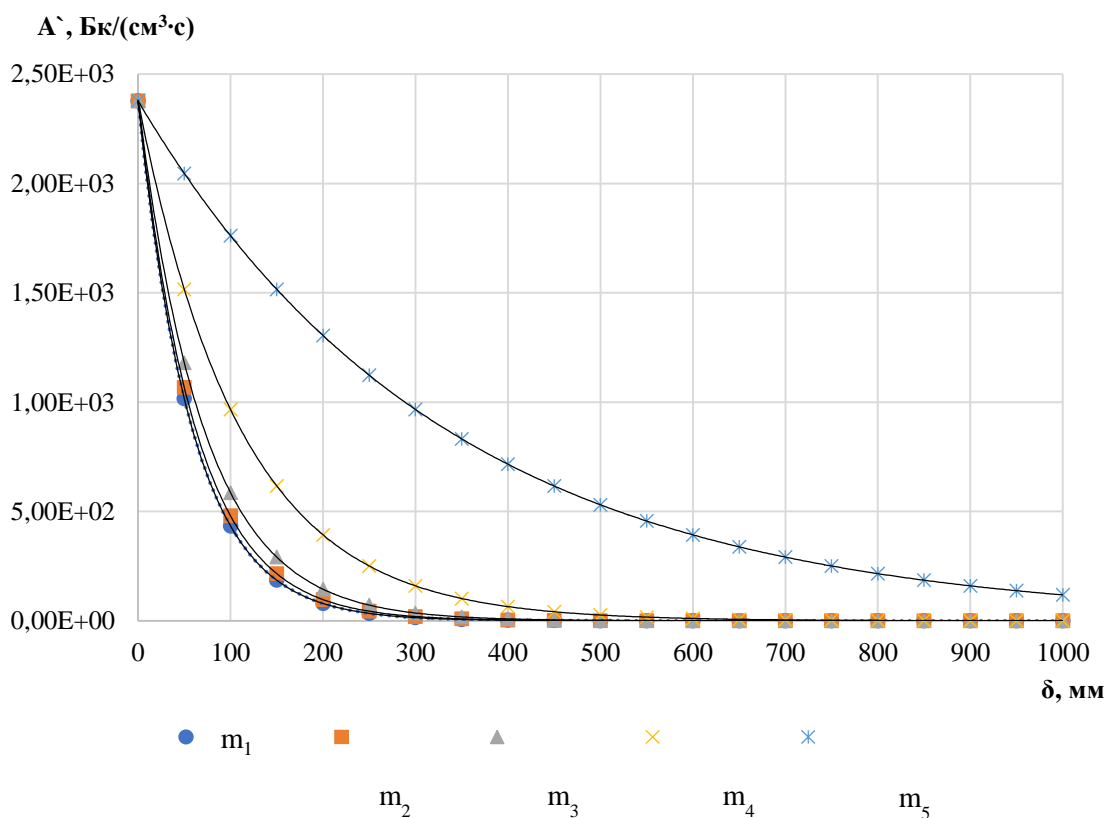


Рисунок 3.9 – Залежність забруднення повітря радіоактивним  $^{41}\text{Ar}$  від товщини зовнішнього шару сповільнювача

Визначення рівнянь, що описують наведені залежності проводиться за допомогою програмного комплексу Microsoft Office Excel методом експоненціальної апроксимації у вигляді:

$$y = a \cdot e^{k \cdot x} \quad (3.13)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що, для даного випадку, показує рівень забруднення повітря радіоактивним  $^{41}\text{Ar}$  при  $x=0$ , тобто при відсутності зовнішнього захисного шару;

$k$  – коефіцієнт пропускання іонізуючого випромінювання, що характеризує темп зміни значення функції, для даного випадку, рівень забруднення за рахунок іонізації атомів  $^{40}\text{Ar}$  від товщини захисного шару.

В результаті отримано наступні рівняння:

- при одному циклі переробки  $m=1$ :  $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,017 \cdot \delta}$ ;
- при двох циклах переробки  $m=2$ :  $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,016 \cdot \delta}$ ;
- при трьох циклах переробки  $m=3$ :  $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,014 \cdot \delta}$ ;
- при чотирьох циклах переробки  $m=4$ :  $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,009 \cdot \delta}$ ;
- при п'яти циклах переробки  $m=5$ :  $A' = 2377,1 \cdot e^{-0,003 \cdot \delta}$ .

Коефіцієнт пропускання іонізуючого випромінювання є ядерно-фізичною характеристикою матеріалу та залежить від кількості циклів переробки. Для ПЕТФу дана залежність представлена на рис. 3.10.

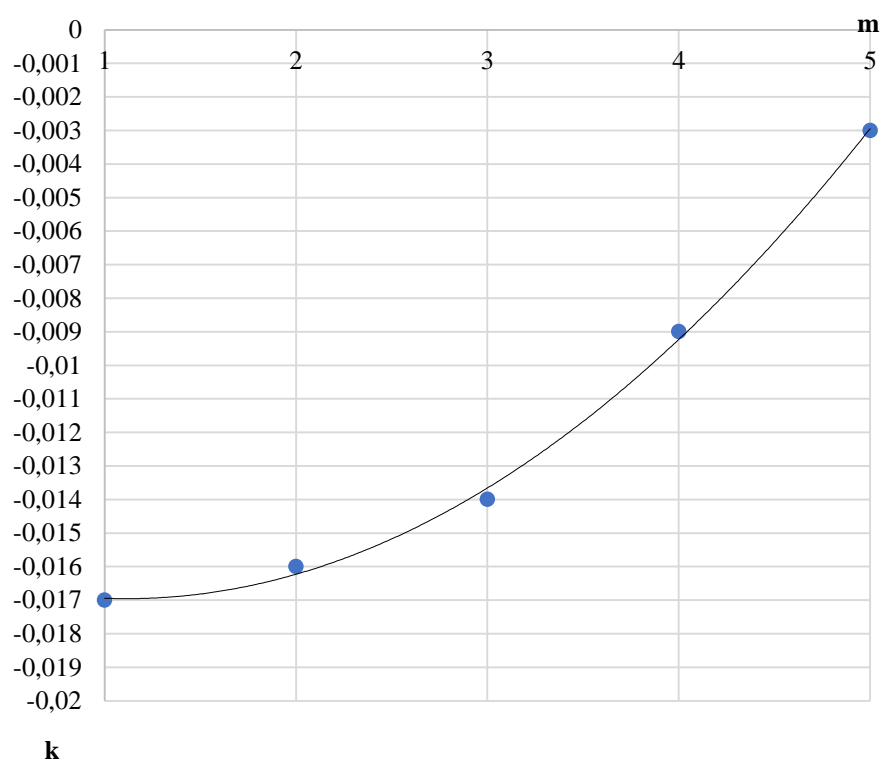


Рисунок 3.10 – Залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від циклу переробки матеріалу захисного шару

Визначивши за допомогою програмного комплексу Microsoft Office Excel рівняння, що описує наведену залежність методом поліноміальної апроксимації отримуємо:

$$k = 2 \cdot 10^{-17} \cdot m^3 + 0,0009 \cdot m^2 - 0,0021 \cdot m - 0,0158. \quad (3.14)$$

За результатами розрахунку можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості циклів переробки захисні властивості ПЕТФ щодо іонізаційного випромінювання погіршуються. Допустима кількість циклів переробки для даного типу матеріалу становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм, в порівнянні з 650 мм – при двох циклах, та 600 мм – при одному циклі переробки. При даних параметрах сповільнювача нормативний критерій щодо активності  $^{41}\text{Ar}$  в атмосферному повітрі відповідно до [47] не порушується.

При подальших циклах переробки необхідна товщина захисного шару буде значно збільшуватися та використання такої сировини буде економічно недоцільним.

### Висновки до розділу 3

1. Проведено порівняльний аналіз методів вторинної переробки пластику, обрано механічний рециклінг як такий, що чинить найменший деструкційний вплив в ході технологічного процесу переробки, в якості вторинної сировини обрано ПЕТФ.

2. У програмному комплексі WIMS проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора із сповільнювачем із вторинної сировини, доведено необхідність збільшення розмірів товщини сповільнювача у 1,4 рази в порівнянні із еталонним матеріалом. Виявлено розширення діапазону робочих температур, що, при одночасному зниженні швидкості теплоносія в каналах активної зони у 3,57 рази, дозволяє зменшити витрату рідкого натрію у 3,6 рази.



3. Виконано аналогічний еталонному матеріалу повірковий теплогідравлічний розрахунок для ПЕТФу, визначено основні теплотехнічні параметри роботи підкритичного реактору та досліджено розподіл теплогенерації та температури за висотою активної зони.

4. Виявлено збільшення напруження, що виникає у сповільнювачі із вторинної сировини від 173,97 МПа до 179,97 МПа в порівнянні з попереднім розрахунком та розширення меж деформацій за об'ємом реактора на 0,01 м. Вказані зміни знаходяться в межах допустимих відхилень, що дозволяє застосування вторинної сировини в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

5. Визначено, що економічна ефективність використання вторинної сировини з врахуванням збільшенням кількості полімеру в 1,3 рази в порівнянні з еталонним поліетиленом, окреслюється економією капіталовкладень у розмірі 1 197 683 грн на момент проведення розрахунку.

6. Отримано залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних етапів переробки, яка описується поліномом 3-го порядку.

7. Виявлено, що допустима кількість циклів переробки для даного типу матеріалу становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм, в порівнянні з 650 мм – при двох циклах, та 600 мм – при одному циклі переробки. При даних параметрах сповільнювача нормативний критерій щодо активності  $^{41}\text{Ar}$  в атмосферному повітрі не порушується.

## 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ

Стартап – це проект, який створюється для пошуку бізнес-моделі, що дозволить приносити стабільний прибуток, зазвичай, в їх основі лежать інноваційні ідеї, ноу-хау тощо. Таким чином, метою створення стартапу є продаж продукту для споживача.

### 4.1 Опис ідеї проекту

В табл. 4.1. визначено зміст ідеї, можливі напрямки її застосування та окреслено основні вигоди, які може отримати користувач даної технології.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Модернізована системи сповільнення швидких нейтронів при трансмутації радіоактивних відходів у підкритичних ядерних установках дозволяє сповільнювати швидкі нейтрони, згенеровані зовнішнім джерелом, до енергії теплового руху	Ядерна енергетика, екологічна діяльність	Підвищення ефективності трансмутації відходів
		Зниження енергозатрат джерела на генерацію додаткового потоку нейтронів
		Зменшення кількості ВЯП з одночасним використанням вторинної сировини – ПЕТФ
		Відсутність затрат або їх зменшення на утилізацію відходів

Основна відмінність запропонованої системи полягає у можливості використання вторинної сировини, що суттєво зменшує капіталовкладення для даної технології. Варто зазначити, що на території України економічне суперництво в даному секторі діяльності мінімальне за рахунок відсутності на ринку виробників відповідного продукту. Причинами низького рівня конкуренції є відсутність матеріальних та науково-технічних засобів виробництва. Наступним етапом є аналіз потенційних техніко-економічних переваг технології в порівнянні із пропозиціями конкурентів (табл. 4.2) [51]–[52].

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№, п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї		Технології конкурентів			W	N	S
			Система сповільнення з ПЕТФ	Поліетилено вий сповільнюва ч (Київський університет)	Парафіновий сповільнювач із борованим прошарком (LemerPax)	(слабка сторона)	(нейтральна сторона)	(сильна сторона)
1	Економічні	Вартість сировини для системи сповільнення, грн/кг	19	110	540	Необхідність диверсифікації сировини	-	Вартість сировини найнижча
		Установка допоміжного обладнання, млрд. грн	1,8	2,8	LemerPax пропонує лише матеріал- сповільнювач	-	Основне обладнання реакторної установки однакове	Відсутність затрат на примусову циркуляцію теплоносія
		Норма амортизації, %	3	8	12	-	-	Низькі експлуатаційні витрати
		Вартість додаткових матеріалів, тис. \$/кг	-	16	16			Однорідність постачання конструкційних матеріалів
		Коефіцієнт сповільнення, в.о.	206,04	541,9	653	Коефіцієнт сповільнення найнижчий	Показник задовольняє умови безпечної експлуатації	-
		Максимальна робоча температура, °C	225	180	255	-	Показник задовольняє умови безпечної експлуатації	-

Продовження таблиці 4.2

№, п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї		Технології конкурентів			W	N	S
			Система сповільнення з ПЕТФ	Поліетиленовий сповільнювач (Київський університет)	Парафіновий сповільнювач із борованим прошарком (LemerPax)	(слабка сторона)	(нейтральна сторона)	(сильна сторона)
2	Технічні	Переріз поглинання нейтронів, барн	228	95,4	134	Показник задовольняє умови безпечної експлуатації	-	-
3	Конструкційні	Необхідність модифікацій ТВЗ	Проектом не передбачено	Необхідно вкорочувати ТВЗ на 1/3 довжини	Проектом не передбачено	-	-	Можливість переробки ТВЗ без конструктивних налаштувань
		Коефіцієнт використання встановленої потужності, %	100	98	Проектом не передбачено	-	-	Можливість перевантаження палива без зупинки роботи реактора
4	Технологічні	Габаритний об'єм реактору, м <sup>3</sup>	28,4	52	Проектом не передбачено	-	-	Зменшення капіталовкладень у 23 рази
5	Екологічні	Безпека експлуатації	Відповідність вимогам надійної експлуатації	Відповідність вимогам надійної експлуатації	Відповідність вимогам надійної експлуатації	-	-	Використання вторинної сировини
6	Безпеки	Циклічна втома матеріалу, МПа	200	275	Показник не визначає умови експлуатації	-	-	Уникнення зупинок реактора при завантаженні палива

Примітка 1. Необхідність диверсифікації сировини зумовлена відсутністю безперебійного постачання вторинного ПЕТФ від надійного виробника.

Примітка 2. Різниця вартості допоміжного обладнання між представленою технологією та конкурентною технологією Київського університету зумовлена необхідністю встановлення циркуляційних насосів для двохзонного трьохконтурного реактора з поліетиленовим сповільнювачем.

Примітка 3. Однорідність постачання конструкційних матеріалів для пропонованої технології зумовлена відсутністю організації закупівель поглинаючого матеріалу  $^{10}\text{B}$ , середня вартість якого становить 16 тис. дол за 1 кг [53].

Примітка 4. Пропонований проект реакторної установи передбачає використання відпрацьованих ТВЗ відразу після вивантаження з басейну витримки.

## 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічний аудит ідеї проекту включає вивчення доступних технологічних процесів, процедур та методів, які можуть бути використані для реалізації продукту та просування його на ринку. Результати проведеної роботи наведено в табл. 4.3 [46], [54]–[56].

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№, п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Сировина для сповільнювача із ПЕТФ	Будівництво заводу із переробки пластику	Технологія розроблена, реалізована на 4 заводах України	Значні капіталовкладення та ресурсні затрати, низький показник рентабельності
		Закупівля у постачальника готових пластівців вторинного ПЕТФ	Структура продажу реалізована на ринку (ЗВПП «Регіон-2001», «Укрвтрорма», та ін.)	Процедура прозора та доступна, вартість 1 кг – 19 грн
2	Тіло реактора із пластикового сповільнювача	Організація системи плавлення пластику на місці	Технологія розроблена	Значні капіталовкладення та ресурсні затрати, низький показник рентабельності
		Закупівля готової конструкції у компанії-підрядника	Можлива виплавка конструкцій під замовлення (ТОВ «Полімеркомплект», ТОВ «Пласт Дніпр» та ін.)	Середня вартість виплавки конструкції об'ємом 29 м <sup>3</sup> – 11 000 грн

## Продовження таблиці 4.3

№, п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
3	Відпрацьовані паливні збірки	Постачання із діючих АЕС України	Система постачання налаштована та доступна	

Аналіз доступних технологій реалізації проекту дозволив сформувати наступну систему впровадження продукту: отримання сировини для формування тіла сповільнювача здійснюватиметься шляхом закупівлі готових пластівців вторинного ПЕТФ; формування об'єму реактора можливе методом плавлення наданої сировини компанією-підрядником; паливо для функціонування підкритичної збірки постачатиметься із діючих на території України АЕС.

## 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Наступний етап включає аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту. Врахувавши потенційні ризики та перспективи розвитку, можливо спрогнозувати тривалість функціонування на ринку та виявити слабкі та сильні сторони діяльності (табл. 4.4) [57]–[58].

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	2 конкуренти, 1 державний орган управління, 1 експлуатуюча організація, (МАГАТЕ)
2	Загальний обсяг продаж	800 тис. грн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	стагнue
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	законодавчий характер: безядерний статус України, відповідність рекомендаціям МАГАТЕ
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	отримання сертифікатів ISO (45001, 11320:2011, 19443:2018 та ін)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

Кількість головних гравців визначено залежно від купівельної спроможності аудиторії. Розглядались наступні варіанти:

- Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, вмотивоване міжнародними домовленостями про безпечну діяльність енергетичного сектору країни;
- експлуатуюча організація НАЕК «Енергоатом» – безпосередній власник утворених відходів, який не зацікавлений у затратах на часткову переробку ВЯП у Росії з наступним поверненням на територію України для технологічного захоронення;
- МАГАТЕ – міжнародна організація, що провадить діяльність в сфері контролю використання ядерних технологій та володіє науково-технічним потенціалом для вирішення проблеми накопичення ВЯП;
- Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України та Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» – науково-дослідні інститути на території України, що проводять експериментальні дослідження в сфері ядерної фізики з метою вирішення проблем атомної енергетики.
- екологічноорієнтовані громадські організації – ряд об'єднань, які зацікавлені у вирішенні питання утилізації ВЯП для безпечного життя громадян держави.

Оскільки останні дві категорії користувачів не забезпечені стабільним та достатнім фінансуванням для закупівлі пропонованого продукту, виникає необхідність відсорткування їх із групи потенційних споживачів. Загальний обсяг продаж визначено як середню ціну за проект ядерного реактора з врахуванням необхідності проведення експериментальних досліджень. Для визначення рівня попиту на технологію необхідно розглянути характеристики потенційних груп клієнтів, визначити їх основні вимоги та особливості співпраці. Результати аналізу наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Утилізація ВЯП	Експлуатуюча компанія	Зацікавлені в мінімальній вартості	Наявність результатів апробації, задовільний рівень безпеки для експлуатуючого персоналу, максимально адаптований продукт до специфіку наявних технологій
		МАГАТЕ	Складність імплементації технології	Абсолютна безпека для населення, відповідність дійсним рекомендаціям
		Державний орган управління	Закупівля повинна здійснюватись через портал Prozorro	Відповідність ратифікованим угодам із світовою спільнотою, відповідність внутрішнім стандартам

Враховуючи складнощі співпраці із МАГАТЕ, даний варіант залишається як резервний у випадку неможливості впровадження технології на території України. Інші можливі загрози та перспективи розглянуто у табл. 4.6 та 4.7.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Законодавчі обмеження	Обмеження зумовлені статусом безядерної країни	Поширення пропозиції на продукт для закордонного ринку
2	Міжнародна сертифікація	Затягування процедури отримання сертифікатів ISO	Удосконалення системи відповідно до вимог сертифікації
3	Технічна здійсненність	Відсутність результатів апробації, валідації, верифікації системи	Залучення науково-дослідних установ з можливістю натурних експериментів
4	Радіофобія населення	Негативна реакція населення на будівництво потенційно небезпечного об'єкту	Проведення громадських слухань



Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Спонсорство	Отримання додаткових коштів від зацікавлених сторін	Проведення експериментальних досліджень
2	Отримання патенту на товар	Запатентований продукт унеможлиблює його незаконне використання	Можливість продажу патенту

Загальна характеристика конкуренції на ринку описана у табл.4.8.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції – <i>монополістична</i>	Мала кількість підприємств, що не контролюють ціновий ринок, усі пропоновані продукти стандартизовані, однак аналогій до пропонованого продукту немає	Вихід на ринок досить легкий, без специфічних перешкод, необхідна сертифікація та відповідність рекомендаціям МАГАТЕ
2. За рівнем конкурентної боротьби – <i>національний</i>	Технологію пропонується впроваджувати на території всієї країни, однак вітчизняні конкуренти відсутні, тому конкуренція можлива із закордонними постачальниками	Пропонована технологія є «перщопрохідцем» на території України, тому має ряд переваг перед закордонними постачальниками, оскільки відсутня необхідність транспортування матеріалів через кордон
3. За галузевою ознакою – <i>внутрішньогалузева</i>	Технологія вузькоспеціалізована	Розширення функціоналу технології від базових потреб споживача до специфічних
4. Конкуренція за видами товарів – <i>товарно-видова</i>	Матеріали-сповільнювачі конкурентів мають схожі характеристики із пропонованим продуктом	Можливість зниження ціни на продукт через нижчу собівартість сировини
5. За характером конкурентних переваг – <i>цінова</i>	Вартість продукту визначає рентабельність функціонування установки	Можливість зниження ціни на продукт через нижчу собівартість сировини
6. За інтенсивністю – <i>не марочна</i>	Через незначну кількість гравців на ринку та нетривале їх функціонування маркування продукції відсутнє	Створення торгової марки для популяризації продукту

Детальний аналіз умов конкуренції в галузі наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти відсутні	Постачальники	Клієнти
Складові аналізу	Київський університет	Наявним бар'єром є наявність у конкурентів патенту на технологію	Коливання цін на пластик незначне через уніфікований метод переробки ПЕТФ, збій в постачанні палива неможливий через стабільність роботи АЕС	Закупівля продукту одноразова
	LemerPax			

Примітка. Товари-замінники на ринку відсутні.

Відсутність потенційних конкурентів та товарів-замінників на території України, а також закордонне розміщення потужностей конкурентів сприяє виходу на ринок пропонованого продукту. Враховуючи епізодичність постачання елементів системи, постачальники не встановлюють умови реалізації технології на ринку. Термін виходу продукту на ринок за умови отримання сертифікатів якості, за попередніми оцінками, складає до 12 місяців.

Конкурентоспроможність підприємства визначає результати його планованої діяльності та залежить не лише від кількісних та якісних характеристик пропонованого продукту, а і потреб споживачів, дій конкурентів, кон'єктури ринку, принципів ведення рекламних заходів та ін. Визначений перелік факторів конкурентоспроможності технології наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10. – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№, п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Відповідність міжнародним та державним стандартам	Дотримання умов безпечної експлуатації ядерних потенційно небезпечних об'єктів
2	Рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій	Мінімізація змін в технологічному процесі діючих АЕС України
3	Показник використання встановленої потужності	Уникнення простою установки за рахунок ППР, етапів перевантажень палива та ін.
4	Вартість продукту та необхідність амортизаційних відрахувань	Зменшення капіталовкладень та уникнення витрат на підтримку робочого стану установки

Далі необхідно проаналізувати сильні та слабкі сторони стартап-проекту (табл. 4.11) [51]–[52].

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспромож ності	Бали	Рейтинг товару «Поліетиленовий сповільнювач» у порівнянні із «Сповільнювачем із ПЕТФ»							Рейтинг товару «Парафіновий сповільнювач із борованим прошарком» у порівнянні із «Сповільнювачем із ПЕТФ»						
			1-20	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2
1	Відповідність міжнародним та державним стандартам	15			√										√	
2	Рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій	18	√										√			
3	Коефіцієнт використання встановленої потужності	19					√					√				
4	Вартість продукту та необхідність амортизаційних відрахувань	17		√								√				

SWOT-аналіз – один із методів визначення зв'язків між сильними та слабкими сторонами, можливими загрозами та перспективами впровадження технології. Результати аналізу для технології підкритичного реактора із сповільнювачем, виготовленим з вторинного ПЕТФ наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Наявність вітчизняних постачальників сировини Наявність вітчизняних користувачів технологією	Відсутність результатів апробації, валідації або верифікації системи Відсутність патенту

Продовження таблиці 4.12

<b>Сильні сторони:</b>	<b>Слабкі сторони:</b>
Відповідність міжнародним та державним стандартам Високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій Максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності Пропагування ідеї «сталого розвитку»	Нестача досвіду експлуатації подібних установок - - -
<b>Можливості:</b>	<b>Загрози:</b>
Відсутність затрат або їх зменшення на утилізацію відходів Зменшення кількості ВЯП з одночасним використанням вторинної сировини – ПЕТФ Вихід на міжнародний ринок Зниження енергозатрат джерела на генерацію додаткового потоку нейтронів	Обмеження, зумовлені статусом безядерної країни Тривалість процедури отримання сертифікатів ISO Негативна реакція населення на реалізацію потенційно небезпечного об'єкту Відмова від атомної енергетики

Альтернативи виведення пропонованого проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії вітчизняних користувачів	74%	до 12 місяців
2	Участь у міжнародних програмах, грантових конкурсах.	81%	1,5 рік
3	Продаж програмного продукту конкурентам за умов неспроможності реалізації	90%	1,2 роки

Найменш тривалим шляхом виходу на ринок з отриманням максимально можливого прибутку є метод поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії вітчизняних користувачів, який також характеризується простотою та незначною кількістю бюрократичних питань.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Наступним етапом розроблення стартап-проекту є розроблення ринкової стратегії, результати наведено в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Міністерство енергетики та вугільної промисловості України	Готовність висока за умов відповідності державним нормам та стандартам	Наявність попиту спричинена відсутністю вітчизняної системи переробки	Інтенсивність нижче середньої, зумовлена закордонними потенційними конкурентами	Складність входу в сегмент середня
2	НАЕК "Енергоатом"	Споживач зацікавлений за умов виконання рекомендацій МАГАТЕ	Наявність попиту спричинена відсутністю вітчизняної системи переробки	Інтенсивність нижче середньої, зумовлена закордонними потенційними конкурентами	Складність входу в сегмент середня
3	МАГАТЕ	Споживач зацікавлений у продукті за умови наявності результатів верифікації	Наявність попиту спричинена відсутністю системи переробки	Інтенсивність вище середнього рівня	Складність входу в сегмент висока

В якості цільових груп обрано Міністерство енергетики та вугільної промисловості України та експлуатуючу компанію НАЕК «Енергоатом». Для охоплення ринку необхідно обрати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії	Стратегія диференційованого ринку	Створення спеціалізованого комплексу маркетингу, спрямованого на задоволення потреб обраного сегменту	Стратегія спеціалізації

Вибір стратегії конкурентної поведінки та стратегії позиціонування наведені в табл. 4.16 та 4.17.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так, на вітчизняному ринку відсутні як конкуренти так і товари-замінники. Розглянуто конкуренцію з європейськими виробниками, однак складнощі, пов'язані із міждержавної торгівлею ускладнюють реалізацію закордонного продукту на території України	Монопольність в сфері атомної енергетики України унеможливорює наявність інших споживачів, пошук нових клієнтів можливий лише за кордоном	Необхідність відповідності продукту встановленому стандарту зобов'язує до уніфікації певних характеристик	Стратегія конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Дотримання умов безпечної експлуатації ядерних об'єктів	Стратегія спеціалізації	Відповідність міжнародним та державним стандартам	Необхідність асоціації відсутня
2	Мінімізації змін в технологічному процесі діючих АЕС України		Високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій	
3	Уникнення простою установок за рахунок ППР, перевантажень палива та ін.		Максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності	
4	Зменшення капіталовкладень та уникнення витрат на підтримку робочого стану установки		Порівняно низька вартість продукту та зменшення амортизаційних відрахувань	

Таким чином, система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку включає стратегію конкурентної ніші та стратегію спеціалізації.

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Завершальним етапом є формування маркетингової програми, що включає визначення переваг концепції потенційного товару (табл. 4.18), опис трьохрівневої моделі товару (табл. 4.19), встановлення цінових меж на товар (табл. 4.20), аналіз системи збуту (табл. 4.21) та визначення концепції маркетингових комунікацій (табл. 4.22) [58]–[59].

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Утилізація ВЯП	Підвищення ефективності трансмутації відходів	Високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій
		Зниження енергозатрат джерела на генерацію додаткового потоку нейтронів	Максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності
		Зменшення кількості ВЯП з одночасним використанням вторинної сировини – ПЕТФ	Порівняно низька вартість продукту та амортизаційних відрахувань
		Відсутність затрат або їх зменшення на утилізацію відходів	-

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Утилізація ВЯП із сповільнювачем із ПЕТФ дозволяє підвищити ефективність трансмутації відходів за рахунок збільшення перерізу взаємодії нейтронів із паливом.

Продовження таблиці 4.19

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Технологія дозволяє знизити енергозатрати джерела на генерацію додаткового джерела нейтронів за рахунок визначеної товщини сповільнювача. Запропонована система дозволяє також використовувати вторинно перероблений матеріал, що зменшує навантаження на середовище.
II. Товар у реальному виконанні	Підкритична реакторна установка циліндричної форми
	Зовнішнє джерело нейтронів розміщене в центральному технологічному каналі реактору
	Сповільнювач із ПЕТФ з товщиною шару 5 см
	В якості теплоносія використовується рідкий натрій
	Відпрацьовані ТВЗ, що використовуються в якості палива, не видозмінені після вивантаження із промислового реактора
	Технологія відповідає міжнародним показникам безпеки та рекомендаціям МАГАТЕ
	Пакування відсутнє
Товар захищатиметься від копіювання за рахунок патентування	

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Відсутні	Жоден із конкурентів не здійснює продаж повних проектів підкритичних реакторів, тому для порівняння цін розглянуто вартість розробки проекту промислового реактору – бл. 800 тис. грн.	Обсяг бюджету НАЕК "Енергоатом", який планується направити на капітальні інвестиції в 2019 році, становить понад 6,2 млрд гривень	750 000 грн – 800 000 грн

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Усі держзакупівлі здійснюються через офіційний портал оприлюднення інформації про публічні закупівлі України Prozorro	Встановлення контакту – надання контактної інформації підрядних організацій, які можуть бути корисними споживачеві	Канал нульового рівня, який включає виробника технології та клієнта	Традиційна
		Доробка – доопрацювання зауважень та неточностей, виявлених при реалізації проекту		



Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтовані на відповідність державним нормам та стандартам, рекомендаціям МАГАТЕ	Діагональні, оскільки продавець та потенційний споживач перебувають на різних рівнях ієрархії	Поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії користувачів	Повідомлення про переваги пропонованого товару, його технологічну здійсненність та вартість	Створення тиску на невирішеність питання утилізації ВЯП, екологічну свідомість та економічну вигоду

Таким чином, застосування пропонованого комплексу реалізації проекту на вітчизняному ринку повинен принести разовий прибуток у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

#### Висновки до розділу 4

Головною ідеєю стартап-проекту є впровадження модернізованої системи сповільнення швидких нейтронів при трансмутації радіоактивних відходів у підкритичних ядерних установках, що дозволяє сповільнювати швидкі нейтрони, згенеровані зовнішнім джерелом, до енергії теплового руху.

Система дозволяє знизити експлуатаційні витрати, конструкція установки передбачає можливість переробки ТВЗ без конструктивних налаштувань та можливість перевантаження палива без зупинки роботи реактора. Запропонована технологія характеризується максимальним коефіцієнтом встановленої потужності та підвищеними показниками екологічної безпеки.

Етапами технології реалізації ідеї проекту є: отримання сировини для формування тіла сповільнювача здійснюватиметься шляхом закупівлі готових пластівців вторинного ПЕТФ; формування об'єму реактора можливе методом плавлення наданої сировини компанією-підрядником; паливо для

функціонування підкритичної збірки постачатиметься із діючих на території України АЕС.

Виокремлено перелік факторів загроз: обмеження зумовлені статусом безядерної країни, затягування процедури отримання сертифікатів ISO, відсутність результатів апробації та негативна реакція населення на будівництво потенційно небезпечного об'єкту.

В якості факторів конкурентоспроможності обрано високий рівень адаптації продукту до специфіки наявних технологій, максимальний коефіцієнт використання встановленої потужності та незначні амортизаційні відрахування продукту.

За альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту прийнято поширення комерційних пропозицій серед цільової аудиторії вітчизняних користувачів. В якості цільових груп обрано Міністерство енергетики та вугільної промисловості України та експлуатуючу компанію НАЕК «Енергоатом».

Застосування пропонованого комплексу реалізації проекту на вітчизняному ринку повинен принести разовий прибуток у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

## ВИСНОВКИ

1. Визначено необхідні умови для трансмутації відходів ядерної енергетики, доведено необхідність сповільнення швидких нейтронів в підкритичних ядерних установках, що керовані зовнішнім джерелом нейтронів.
2. Обґрунтовано доцільність проведення дослідження можливості застосування пластику в якості сповільнювача в підкритичних системах, досліджено існуючий теоретичний та практичний досвід застосування пластику в якості сповільнювача швидких нейтронів, виявлено відсутність розробок, що засновані на використанні пластику, який піддавався утилізації.
3. Визначено основні параметрами, що визначають роботу підкритичної ядерної установки. Методом ієрархій за Т. Сааті проведено порівняння полімерних матеріалів, що можуть бути використані в якості сповільнювача, та доведено оптимальність застосування поліетилену низького тиску.
4. У програмному комплексі WIMS проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора з поліетиленовим сповільнювачем, визначено ядерні концентрації ізотопів, що містяться в ВЯП, встановлено залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від товщини сповільнювача між технологічними каналами реактору.
5. Визначено основні показники безпеки функціонування підкритичного реактору з поліетиленовим сповільнювачем та встановлені основні локації можливих деформацій, результати свідчать про можливість застосування синтетичних полімерів в якості сповільнювачів у підкритичних системах.
6. Проведено порівняльний аналіз методів вторинної переробки пластику та обрано механічний рециклінг як такий, що чинить найменший деструкційний вплив в ході технологічного процесу переробки, проведено розрахунок геометричних розмірів підкритичного реактора із сповільнювачем із вторинної сировини, доведено необхідність збільшення розмірів товщини

сповільнювача у 1,4 рази в порівнянні із еталонним матеріалом. Виявлено розширення діапазону робочих температур, що, при одночасному зниженні швидкості теплоносія в каналах активної зони у 3,57 рази, дозволяє зменшити витрату рідкого натрію у 3,6 рази.

7. Виконано повірковий теплогідрравлічний розрахунок для ПЕТФу, виявлено збільшення напруження, що виникає у сповільнювачі із вторинної сировини від 173,97 МПа до 179,97 МПа в порівнянні з еталонним реактором та розширення меж деформацій за об'ємом реактора на 0,01 м. Вказані зміни знаходяться в межах допустимих відхилень, що дозволяє застосування вторинної сировини в якості сповільнювачів у підкритичних системах.

8. Визначено, що економічна ефективність використання вторинної сировини з врахуванням збільшення кількості полімеру в 1,3 рази в порівнянні з еталонним поліетиленом, окреслюється економією капіталовкладень у розмірі 1 197 683 грн на момент проведення розрахунку.

9. Отримано залежність коефіцієнту пропускання іонізуючого випромінювання від товщини зовнішнього шару сповільнювача після циклічних етапів переробки, яка описується поліномом 3-го порядку.

10. Виявлено, що допустима кількість циклів переробки для ПЕТФу становить три, при якій товщина сповільнювача становитиме 750 мм. При даних параметрах сповільнювача нормативний критерій щодо активності  $^{41}\text{Ar}$  в атмосферному повітрі не порушується. При подальших циклах переробки використання вторинної сировини буде економічно недоцільним.

11. Розроблений стартап-проект реалізації технології на вітчизняному ринку прогнозує отримання разового прибутку у розмірі близько 800 тис. грн протягом 1 року від дати отримання сертифікату відповідності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Детектори нейтронів на основі неорганічних сцинтиляторів. Рижиков В.Д. та ін. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2009. № 24. URI: [http://teib.info/?wpfb\\_dl=816](http://teib.info/?wpfb_dl=816) (дата звернення: 11.12.2018).
2. Бабенко В.О., Гулік В. І., Павлович В. М. Про можливість трансмутації радіоактивних відходів в електроядерній системі, керованій потужним нейтронним генератором. *Проблеми безпеки атомних електростанцій*. 2011. № 16. URI: [http://mntc.smn.com.ua/downloads/2011\\_16/c8.pdf](http://mntc.smn.com.ua/downloads/2011_16/c8.pdf) (дата звернення: 11.12.2018).
3. Бабенко В.О., Гулік В. І., Павлович В. М. Моделирование двухзонных электроядерных систем. *Ядерна фізика та енергетика*. 2012. Т. 13. №3. URI: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP\\_meta&C21COM/=S&2\\_S21P03=FILE=&2\\_S21STR=yadf\\_2012\\_13\\_3\\_9](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM/=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=yadf_2012_13_3_9) (дата звернення: 11.12.2018).
4. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС, схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі: монографія/відп. ред. О. В. Єфімова. Харків: НТУ «ХП», 2017. 420 с.
5. Детектор для регистрации нейтронов и гамма-излучения: пат. 2158011 Россия: МПК G01T1/20, G01T3/06. заявл. 04.06.1998; опубл. 20.10.2000, Бюл. № 4. 110 с.
6. Устройство для детектирования и спектрометрии нейтронов: пат. 2222818 Россия: МПК G01T3/06. заявл. 09.07.2002; опубл. 27.01.2004, Бюл. № 3. 54 с.
7. Источник тепловых нейтронов: пат. 2362226 Россия: МПК G21G4/02. № 2007145077/28; заявл. 06.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. 8 с.
8. Фотонейтронный источник: пат. 2634330C1 Россия: МПК G21G4/02. № 2017103215A; заявл. 01.02.2017; опубл. 26.10.2017, Бюл. № 24. 12 с.

9. Блок детектування нейтронного випромінення БДПН-07: настанова щодо експлуатування ВІСТ.418251.002 РЭ. URI: <http://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/Nastanova-shhodo-ekspluatuvannya-BDPN-07.pdf> (дата звернення: 11.12.2018).

10. Киевицкая А. И. Исследования в области перспективных ядерно-энергетических систем для производства энергии и выжигания радиоактивных отходов. *Энергетическая стратегия*. 2009. № 5. С. 28–31.

11. Киевицкая А. И., Фоков, Ю. Г. Подкритический стенд «ЯЛІНА» для изучения нейтроннофизических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями. *Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез*. 2015. Т. 38. № 3. С. 53–58. URI: [http://vant.iterru.ru/engvant\\_2015\\_3/6.pdf](http://vant.iterru.ru/engvant_2015_3/6.pdf) (дата звернення: 11.12.2018).

12. Киевицкая А. И. Нейтронно-физические характеристики подкритических систем: стенд «ЯЛІНА»: автореф. дис. на соискание науч. степ. д-ра ф.-м. наук: 01.04.16. Минск, 2017. 42 с.

13. Cao Y., Gohar Y., Zhong Z. Measuring and Monitoring KIPT Neutron Source Facility Reactivity: Nuclear Engineering Division. Chicago: Argonne National Laboratory, 2015. 68 p.

14. Чигринов С. Е. Бустерная подкритическая сборка, управляемая генератором нейтронов. Минск, 2004. 31 с. (Препринт ОИЭЯИ-14).

15. Карнаухов І. М. Про спорудження ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів». *Вісник НАН України*. 2014. Вип. 9. С. 23–28.

16. Шидловський М. С. Нові матеріали: структура і механічні властивості конструкційних полімерів: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017. 193 с. URI: <http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20880/1/D0%9D%D/0%BE%D0%B2%/D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%/D0%B0%D0%BB%D0%B8.%20%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%/D0%BD%D0%B0%201.pdf> (дата звернення: 11.12.2018).

17. Особенности полиэтилентерефталата (ПЭТ). Europrint: веб-сайт. URI: <http://europrint-ua.com/pet-features.html> (дата звернення: 11.12.2018).

18. ГОСТ 16338-85. Полиэтилен низкого давления. Технические условия. – Действующий от 01.01.1987. – Москва: Стандартинформ, 2005. 35 с.
19. Полипропилен (ПП): основные свойства, область применения. Plastinfo: веб-сайт. URI: <https://plastinfo.ru/information/articles/52> (дата звернення: 11.12.2018).
20. Полиэтилен, полистирол, полипропилен – полистирол (ПС). Гранула: веб-сайт. URI: <http://granula.at.ua/index/0-28> (дата звернення: 11.12.2018).
21. Сколько обойдется построить атомную электростанцию. Обзор: веб-сайт. URI: <http://skolko-poluchaet.ru/skolko-stoit/skolko-obojdetsya-postroit-atomnuyu-elektrostantsiyu.html> (дата звернення: 11.12.2018).
22. Теплоизоляция. ТТЦ Звукоизоляция: веб-сайт. URI: <http://www.uns.ru/batiz.html> (дата звернення: 11.12.2018).
23. Нікольський М. Вдосконалення методів моделювання пошкодження оболонки паливного елемента ЯЕУ з ВВЕР для підвищення ефективності експлуатації: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: 05.14.14. Одеса, 2015. 242 с.
24. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: учеб. пособ. для ВУЗов/Бартоломей Г. И др. Москва, 1982. 254 с.
25. Атомная энергия: у 15 т. /глав. ред. Миллионщиков М. Д. Москва: Октябрь, 1962. Т. 13. 415 с.
26. Широков С. В. Курс лекций: теория ядерных реакторов. Вид. 1-е. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 336 с.
27. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Москва: Атомиздат, 1968. 485 с.
28. Пинаев С. С. Исследование в обоснование применения свинец-висмутовой эвтектики в качестве теплоносителя бланкета термоядерного реактора: дис. на соискание науч. степ. канд. тех. наук: 05.04.11. Нижний Новгород, 2002. 237 с.
29. Deen J. R., Woodruff W. L. WIMS-D4M: User manual. Rev.0. Illinois: University of Illinois Champaign-Urbana, 1995. 95 p.

30. Окунев В. С. Нейтронно-физический расчет решетки ядерного реактора на основе газокINETической теории переноса: учеб. пособ. Москва: Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана, 2011. 145 с.
31. Ravnik M., Zagar T. TRIGA. A Program Package for Research Reactor. Calculations. Ljubljana: Institut Jozef Stefan, Reactor Physics Department, 2016. 24 p.
32. Широков С. В., Гальченко В. В., Кіліна О. О. Методичні вказівки до курсового проекту з курсу «Ядерні енергетичні реактори». Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 26 с.
33. Наумов В. А., Караваева Е. В. Изотопный состав отработавшего ядерного топлива активных зон реакторов ОК-150 ледокола «Ленин». *Вестник МГТУ*. 2013. Т. 16. №1. С. 137-140.
34. Ковбасенко Ю. П., Еременко М. Л. Определение изотопного состава отработавшего топлива реакторов РБМК. Киев: Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 2011. С. 35-42.
35. Баранюк О. В. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Системи автоматизованого проектування в енергетичних установках». CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки в каналах реактору типу ВВЕР. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 36 с.
36. Едаменко Н. С., Кудинович И. В. Влияние пространственного распределения внешнего источника нейтронов на мощность подкритического реактора различной геометрической формы. *Вестник СПбГУ*. 2006. №2. С. 101-106.
37. Головкина А. Г., Кудинович И. В., Овсянников Д. А. Мощность подкритического однородного реактора в зависимости от пространственного распределения и энергии нейтронов внешнего источника. *Вестник СПбГУ*. 2012. №2. С. 13-24.
38. Свойства полимеров. ЛакПром: веб-сайт. URI: <http://lkmprom.ru/clauses/issledovaniya/osnovnye-svoystva-polimerov/> (дата звернення: 11.12.2018).



39. Утилизация пластмассовых отходов, оборудование и переработка пластмассы, пластика: веб-сайт. URI: <http://kudavlozيتدengi.adne.info/utilizaciya-plastmass/> (дата звернення: 11.12.2018).

40. Суберляк О. В., Баштанник П. І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. Київ, 2006. 270 с.

41. Охріменко О. В., Вогнівенко Л. П., Біла Т. А. Методи переробки твердих побутових відходів. *Таврійський науковий вісник*. 2018. № 101. С. 214-219.

42. Переработка полиэтилена в вопросах и ответах: веб-сайт. URI: <http://pererabotka.info/articles/279-pererabotka-polyetilena> (дата звернення: 11.12.2018).

43. Властивості поведінки вторинної сировини при переробці: веб-сайт. URI: <http://jak.magey.com.ua/articles/vlastivosti-povedinku-vtorinnoi-sirovini-pri.html> (дата звернення: 11.12.2018).

44. Полистирол (ПС): вторичная переработка, способы утилизации ПС отходов: веб-сайт. URI: <https://plastinfo.ru/information/articles/165> (дата звернення: 11.12.2018).

45. Полиэтилен низкого давления: веб-сайт. URI: <https://prom.ua/Polietilen-nizkogo-davleniya.html> (дата звернення: 11.12.2018).

46. Коваленко І. В., Перковська О. В. Дослідження фізико–механічних та теплофізичних властивостей вторинного ПЕТФ. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 21 с.

47. Про правовий режим території, що зазнали радіоактивного забруднення в результаті Чорнобильської катастрофи: Закон України від 28.02.1991 // База даних «Законодавства України»/ВР України. URI : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-12> (дата звернення: 11.12.2018).

48. Про Концепцію проживання населення на територіях Української РСР з підвищеними рівнями радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: Постанова Верховної Ради Української СРС від 27.02.1991 // База даних «Законодавства України»/ВР України. URI : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791-12> (дата звернення: 11.12.2018).

49. Nuclear protection & Environment. Range of neutron-absorbing materials. LemerPax: web-site. URI: [https://www.world-nuclear-exhibition.com/\\_\\_novadocuments/485711?v=636655513533130000](https://www.world-nuclear-exhibition.com/__novadocuments/485711?v=636655513533130000) (date of treatment: 11.12.2018).

50. Широков С. В., Гальченко В. В. Пособие по решению задач по курсам «Теория ядерных реакторов», «Энергетические ядерные реакторы» и «Нестационарные процессы в ядерных реакторах». Киев: НТУУ «КПИ», 2006. 80 с.

51. Pyeon C. H. Experimental Benchmarks for Accelerator-Driven System (ADS). Kyoto: Kyoto University Critical Assembly, 2012. 51 p.

52. LemerPax: web-site. URI: <https://www.lemerpax.com/en/> (date of treatment: 11.12.2018).

53. Изотоп В-10: веб-сайт. URI: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=801> (дата звернення: 11.12.2018).

54. Регион-2001 – официальный сайт: веб-сайт. URI: <https://region-2001.uaprom.net/> (дата звернення: 11.12.2018).

55.: Украинское производственно-экологическое объединение «Укрваторма»: веб-сайт. URI: <http://ukrvtorma.com.ua/general> (дата звернення: 11.12.2018).

56. Plast Dnepr: веб-сайт. URI: <http://www.plastdnepr.com/oversized-tank> (дата звернення: 11.12.2018).

57. Сертифікація НАЕК «Енергоатом» : веб-сайт. URI: [http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about/management\\_system/certificates/](http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about/management_system/certificates/) (дата звернення: 11.12.2018).

58. Термоядерный реактор ITER: веб-сайт. URI: <https://masterok.livejournal.com/207862.html> (дата звернення: 11.12.2018).

59. Фінансовий план НАЕК «Енергоатом»: веб-сайт. URI: <https://www.rbc.ua/ukr/news/kabmin-utverdil-finplan-energoatoma-20181514374511.html> (дата звернення: 11.12.2018).

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Залежність густини потоку нейтронів на зовнішній поверхні реактору та забруднення повітря радіоактивним  $^{41}\text{Ar}$  від товщини зовнішнього шару сповільнювача

d,	$\Phi_1$	$A'_1$	$\Phi_2$	$A'_2$	$\Phi_3$	$A'_3$	$\Phi_4$	$A'_4$	$\Phi_5$	$A'_5$
мм	$\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\frac{Bк}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$	$\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\frac{Bк}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$	$\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\frac{Bк}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$	$\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\frac{Bк}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$	$\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$\frac{Bк}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$
0	1,00E+15	2,38E+03	1,00E+15	2,38E+03	1,00E+15	2,38E+03	1,00E+15	2,38E+03	1,00E+15	2,38E+03
50	4,27E+14	1,02E+03	4,49E+14	1,07E+03	4,97E+14	1,18E+03	6,38E+14	1,52E+03	8,61E+14	2,05E+03
100	1,83E+14	4,34E+02	2,02E+14	4,80E+02	2,47E+14	5,86E+02	4,07E+14	9,66E+02	7,41E+14	1,76E+03
150	7,81E+13	1,86E+02	9,07E+13	2,16E+02	1,22E+14	2,91E+02	2,59E+14	6,16E+02	6,38E+14	1,52E+03
200	3,34E+13	7,93E+01	4,08E+13	9,69E+01	6,08E+13	1,45E+02	1,65E+14	3,93E+02	5,49E+14	1,30E+03
250	1,43E+13	3,39E+01	1,83E+13	4,35E+01	3,02E+13	7,18E+01	1,05E+14	2,51E+02	4,72E+14	1,12E+03
300	6,10E+12	1,45E+01	8,23E+12	1,96E+01	1,50E+13	3,56E+01	6,72E+13	1,60E+02	4,07E+14	9,66E+02
350	2,61E+12	6,19E+00	3,70E+12	8,79E+00	7,45E+12	1,77E+01	4,29E+13	1,02E+02	3,50E+14	8,32E+02
400	1,11E+12	2,65E+00	1,66E+12	3,95E+00	3,70E+12	8,79E+00	2,73E+13	6,50E+01	3,01E+14	7,16E+02
450	4,76E+11	1,13E+00	7,47E+11	1,77E+00	1,84E+12	4,37E+00	1,74E+13	4,14E+01	2,59E+14	6,16E+02
500	2,03E+11	4,84E-01	3,35E+11	7,97E-01	9,12E+11	2,17E+00	1,11E+13	2,64E+01	2,23E+14	5,30E+02
550	8,70E+10	2,07E-01	1,51E+11	3,58E-01	4,53E+11	1,08E+00	7,08E+12	1,68E+01	1,92E+14	4,57E+02
600	3,72E+10	8,84E-02	6,77E+10	1,61E-01	2,25E+11	5,35E-01	4,52E+12	1,07E+01	1,65E+14	3,93E+02
650	1,59E+10	3,78E-02	3,04E+10	7,23E-02	1,12E+11	2,65E-01	2,88E+12	6,85E+00	1,42E+14	3,38E+02
700	6,79E+09	1,61E-02	1,37E+10	3,25E-02	5,55E+10	1,32E-01	1,84E+12	4,37E+00	1,22E+14	2,91E+02
750	2,90E+09	6,90E-03	6,14E+09	1,46E-02	2,75E+10	6,55E-02	1,17E+12	2,78E+00	1,05E+14	2,51E+02
800	1,24E+09	2,95E-03	2,76E+09	6,56E-03	1,37E+10	3,25E-02	7,47E+11	1,77E+00	9,07E+13	2,16E+02
850	5,30E+08	1,26E-03	1,24E+09	2,95E-03	6,79E+09	1,61E-02	4,76E+11	1,13E+00	7,81E+13	1,86E+02
900	2,27E+08	5,39E-04	5,57E+08	1,32E-03	3,37E+09	8,02E-03	3,04E+11	7,22E-01	6,72E+13	1,60E+02
950	9,69E+07	2,30E-04	2,50E+08	5,95E-04	1,67E+09	3,98E-03	1,94E+11	4,60E-01	5,78E+13	1,38E+02
1000	4,14E+07	9,84E-05	1,13E+08	2,68E-04	8,32E+08	1,98E-03	1,23E+11	2,93E-01	4,98E+13	1,18E+02